Primljen / Received: 30.7.2019.
Ispravljen / Corrected: 20.9.2019.
Prihvaćen / Accepted: 23.9.2019.
Dostupno online / Available online: 10.10.2019.

Rizik od potresa za Hrvatsku: pregled istraživanja i postojećih procjena sa smjernicama za budućnost

Autori:

Izv.prof.dr.sc. Josip Atalić, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
atalic@grad.hr

Doc.dr.sc. Marta Šavor Novak, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
msavor@grad.hr

Doc.dr.sc. Mario Uroš, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
uros@grad.hr

Pregledni rad

Josip Atalić, Marta Šavor Novak, Mario Uroš

Rizik od potresa za Hrvatsku: pregled istraživanja i postojećih procjena sa smjernicama za budućnost

Iz pozicije glavnog izvršitelja za procjene rizika od potresa za Hrvatsku, napravljen je pregled brojnih i metodološki različitih procjena rizika, uključujući nepovezane pojedinačne inicijative. Cilj rada je pozicionirati i osvrnuti se na doprinose svake od procjena, ali i upozoriti na manjkavosti odnosno ograničenja. Opisana je i uobičajena metodologija analizirajući svaki od faktora seizmičkog rizika, dajući pregled sadašnjeg stanja istraživanja u Hrvatskoj i u svijetu te nudeći smjernice za daljnje strateško djelovanje jer svi postojeći rezultati ističu potres kao neprihvatljiv rizik za Hrvatsku.

Ključne riječi:
rizik od potresa, seizmički hazard, izloženost, oštetljivost, strategija, umanjenje posljedica

Subject review

Josip Atalić, Marta Šavor Novak, Mario Uroš

Seismic risk for Croatia: overview of research activities and present assessments with guidelines for the future

An overview of numerous methodologically different risk assessments, including sporadic individual initiatives, is presented from the perspective of a leading expert for earthquake risk assessments for Croatia. The aim of the paper is to evaluate and discuss contributions of each of the assessments, but also to caution about their deficiencies i.e. limitations. A common methodology for estimating seismic risk is described by analysing each of its factors, by providing an overview of current research in Croatia and worldwide, and by offering guidelines for further strategic actions, as all existing results reveal that earthquake is an unacceptable risk for Croatia.

Key words:
seismic risk, seismic hazard, exposure, vulnerability, strategy, mitigation of effects

Übersichtsarbeit

Josip Atalić, Marta Šavor Novak, Mario Uroš

Überblick über die Erdbebenrisikoforschung und -Bewertung für Kroatien mit Leitlinien für die Zukunft

Ausgehend von der Position des Hauptausführenden für Erdbebenrisikobewertungen für Kroatien wurde ein Überblick über zahlreiche und methodisch unterschiedliche Risikobewertungen einschließlich nicht verbundener Einzelinitiativen gegeben. Ziel der Arbeit ist es, die Beiträge der einzelnen Bewertungen zu positionieren und auf sie einzugehen, aber auch auf die Mängel und Einschränkungen hinzuweisen. Es wird die übliche Methodik beschrieben, indem die einzelnen seismischen Risikofaktoren analysiert werden, ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung in Kroatien und weltweit gegeben wird und Leitlinien für weitere strategische Maßnahmen bereitgestellt werden, da alle vorliegenden Ergebnisse das Erdbeben als inakzeptables Risiko für Kroatien betonen.

Schlüsselwörter:
Erdbebenrisiko, Erdbebengefahr, Exposition, Schadensempfindlichkeit, Strategie, Schadensminderung

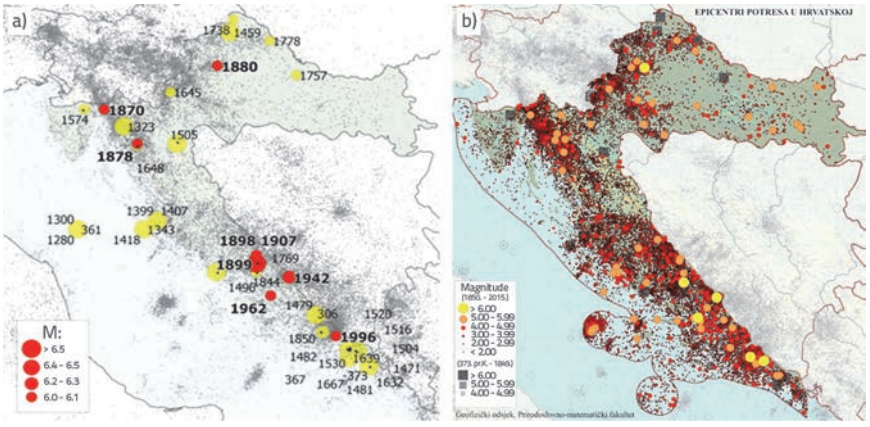
1. Uvod

Pristupanjem Europskoj uniji Hrvatska je preuzela mnoge obveze što je uključivalo i obveze iz područja upravljanja rizicima od katastrofa. U skladu s člankom 6. Odluke 1313/2013/EU Europskog parlamenta i vijeća od 17. prosinca 2013. o mehanizmu Unije za civilnu zaštitu, zemlje članice su morale do 22. prosinca 2015. dostaviti sažetak procjene rizika od katastrofa Europskoj komisiji (EK). Hrvatska Vlada je 2014. godine donijela Odluku kojom su pokrenute procedure prema ostvarenju zadanih ciljeva, pri čemu su pozvane sve relevantne institucije u Hrvatskoj za pojedini rizik i izabrani su izvršitelji za pojedine rizike. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu preuzeo je odgovornost i postao glavni izvršitelj za izradu procjene rizika od potresa. Tijekom 2015. godine je napravljen početni korak odnosno izrada Procjene rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj – rizik od potresa [1] (opisana u poglavlju 3.4), pri čemu je rizik od potresa, uz poplave i požare, vrednovan kao neprihvatljiv za Hrvatsku. Proces upravljanja rizicima je nastavljen pa je tijekom 2018. godine izrađena Procjena sposobnosti upravljanja rizicima za Republiku Hrvatsku te ažuriranje i nadopune procjena rizika od katastrofa za Republiku Hrvatsku – potres [2] (opisano u poglavlju 3.8).

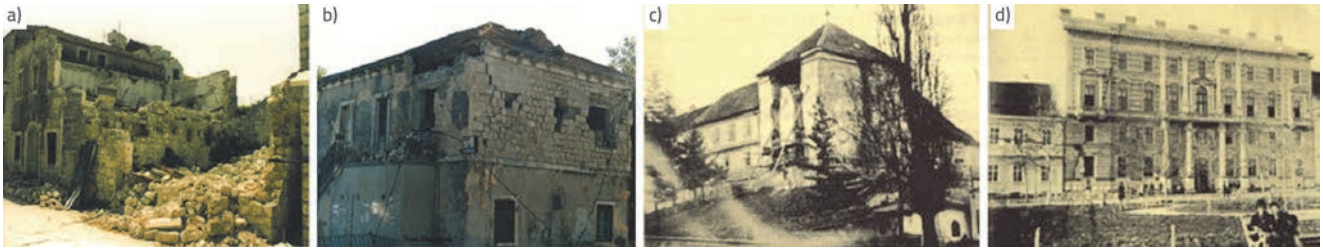
Rad na procjenama rizika od potresa u Hrvatskoj nije započeo zahtjevima Europske komisije, ali činjenica je da se, za razliku od ostalih ugroženih država u Europi, njime bavilo periodički i nesustavno, što je predstavljalo veliki problem u radu na procjenama. Trenutačno je dostupan niz različitih procjena s različitim pristupima i metodologijom, izrađene od stručnjaka različitih struka, pa je stoga jedan od ciljeva ovog rada napraviti pregled svih postojećih procjena rizika u Hrvatskoj (poglavlje 3.) radi kritičkog osvrta na doprinose svake od njih i međusobnog pozicioniranja. Osim procjena, dana je i šira perspektiva na ostale pojedinačne aktivnosti ističući brojne izazove (probleme) s kojima smo u Hrvatskoj suočeni. Postojeći problemi su ozbiljna prepreka pouzdanijim (preciznijim) procjenama rizika od potresa i na njima je potrebno kontinuirano raditi kako bi se postavio temelj kvalitetnim odlukama/strategiji za umanjenje posljedica (također zahtjev EK). Stoga su dane i smjernice za buduća djelovanja na osnovi pregleda trenutačnog stanja istraživanja (trendova) u Hrvatskoj i u svijetu analizirajući svaku od komponenti seizmičkog rizika. Bitno je istaknuti da, unatoč nepouzdanostima, sve procjene rizika govore o katastrofalnim posljedicama, koje se zasad uglavnom ignoriraju, a Hrvatska ih samostalno teško može prevladati. Nažalost, aktivnosti kojima bi se umanjivale posljedice potresa su pojedinačne i minimalne, kao i razvoj svijesti o riziku od potresa unatoč naporima poput VII. konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa (jedna od pozitivnih inicijativa) na kojoj je zaključno istaknuto da je potres neprihvatljiv rizik za Hrvatsku [3].

Uvid o potencijalnim štetama se može dobiti osvrtom na povijesne podatke, jer se potresi obično na nekom području ponavljaju. U Hrvatskoj su zabilježena dva katastrofalna potresa intenziteta X° MCS ljestvice (Mercalli-Cancani-Sieberg) i to 361. godine na otoku Pagu (kada je grad Cissa propao u more) i 1667. godine u Dubrovniku (kada je poginulo 3.000 ljudi) te 21 potres stupnja IX. Slika 1 prikazuje epicentre svih zabilježenih potresa u Hrvatskoj od 373. godine pr. Kr. do 2015. godine s istaknutim najvećim magnitudama [4]. Da se potresi ne događaju samo u povijesti, potvrđuju 36.733 evidentirana potresa u Hrvatskoj i okolici, od 2006. do 2015. godine, od čega ih je 37 bilo magnitude od 4,0 do 4,9 [5].

Zadnje značajnije posljedice od potresa u Hrvatskoj su nastale nakon potresa magnitude M_L = 6,0 prema Richteru 1996. godine kod Stona [6] za koji se procjenjuje da je bio intenziteta VIII° MCS ljestvice. Tada je samo u manjem gradu poput Stona i njegovoj okolici (na površini od 400 km^2) oštećeno oko 1.900 građevina (slika 2.a i 2.b). Potres u Stonu je jasno upozorio na izazove za sustav prilikom većih katastrofa, što se posebice odnosi na procjene oštećenja nakon potresa (unatoč izvrsnoj reakciji inženjera [7]) i dugotrajni oporavak (nužno dugotrajno zbrinuti ljude). Budući da je to bilo poslijeratno razdoblje, nije se iskoristila prilika za razvijanje svijesti o potresima i preventivnom djelovanju za buduće potrese, posebice u nekom od većih gradova [8]. Zadnji razarajući potres u nekom od većih gradova je bio 1880. godine u Zagrebu intenziteta VIII° MCS ljestvice s epicentrom na području Medvednice. Razoren je bio veliki dio grada, gotovo sve zgrade su pretrpjele neko oštećenje (službeno prijavljeno oštećenje 1.758 kuća), a oko 13 % zgrada se srušilo (slika 2.c i 2.d). Zagreb je tada imao manje od 30.000 stanovnika, a mnogo ih se iselilo s obzirom na mogućnosti i hladnu zimu [9]. Iseljavanje je danas jedan od velikih problema u Hrvatskoj, a još jedan katastrofalni potres, koji bi uništio dio stambenog fonda i/ili radna mjesta, mogao bi ga znatno dodatno stimulirati, ali i narušiti krhku ekonomsku (gospodarstvo) te društvenu i političku stabilnost države [10]. Nameće se pitanje o spremnosti, sposobnosti i kapacitetima sustava u slučaju potresa u nekom od većih gradova poput Zagreba, Splita,



Slika 1. Epicentri potresa u Hrvatskoj od 373 prije Krista do 2015. [4, 5]



Slika 2. a) i b) Oštećenja nakon potresa u Stonu [6]; c) i d) Oštećenja nakon zagrebačkog potresa [9]

Rijeke ili Dubrovnika. Nisu potrebne detaljne analize da bi se zaključilo kako, unatoč radu i zalaganju, u Hrvatskoj ne postoje dovoljni kapaciteti za brzu reakciju nakon potresa (spašavanje i zbrinjavanje ljudi, procjene oštećenja građevina i slično), iako su okviri sustava odgovora uspostavljeni. Postavljanje sustava koji bi osigurao brži oporavak zajednice još je izazovnije, što se moglo uočiti prilikom nedavnih poplava u istočnoj Slavoniji (Gunja, 2014.) i reakcija poput Zakona o saniranju posljedica katastrofe na području Vukovarsko-srijemske županije (NN 77/14). Unatoč tadašnjim značajnim štetama, one bi bile znatno manje od šteta koje se mogu očekivati prilikom djelovanja razornih potresa poput nedavnih potresa u Italiji (L'Aquila 2009. [11], Emilia Romagna 2012. [12], središnji Apenini 2016. [13]), pri čemu govorimo o štetama reda veličine državnog proračuna Hrvatske. Štoviše, i istraživanja u svijetu upozoravaju na potencijalno velike probleme država poput Hrvatske, a u posljednjim desetljećima je uočen trend povećanja gospodarskih i društvenih gubitaka diljem svijeta [14, 15]. Primjerice, 2011. godine je gotovo dvije trećine ekonomskih gubitaka nastalo zbog geofizičkih događaja (uglavnom razornih potresa). Korisno bi bilo naučiti na iskustvu danas vodećih država u području strategija i mjera smanjenja rizika od potresa (primjerice Japan, Novi Zeland, Čile, SAD, Italija, Grčka i slično), koje su uglavnom retroaktivno djelovale (kroz značajna ulaganja), nakon što su pretrpjele znatne gubitke [16]. I na ovim se prostorima intenzivnije djelovalo tek nakon razornih potresa (Skopje 1963., Banja Luka 1969., Crna Gora 1979.) [17], ali kao da se sve brzo zaboravlja unatoč činjenici da su posljedice bile velike i unatoč novim upozorenjima iz susjednih, po fondu građevina nama donekle sličnih država poput Italije.

Nažalost, sve navedeno se čini nedovoljnim za bolju osviještenost o potresima u Hrvatskoj što se može uočiti po interesu javnosti koja se svodi na kratkotrajnu reakciju (najčešće samo komentari) nakon djelovanja potresa pri kojem smo osjetili podrhtavanje. Također, kad se javno raspravlja o energetskoj obnovi ili održavanju građevina (primjerice mostova), potresna otpornost se najčešće i ne spominje. Niti nova nacionalna strategija (u izradi) ne prepoznaje rizik od potresa, pa zasad teret ublažavanja posljedica ostaje na pojedincima koji kroz pojedinačne aktivnosti (projekte, studije i slično) pokušavaju djelovati. Djelovanje potresa ne možemo spriječiti, ali srećom još uvijek imamo vremena (priliku) za strateško preventivno djelovanje prije nego što se suočimo s posljedicama još jednog razornog potresa [8].

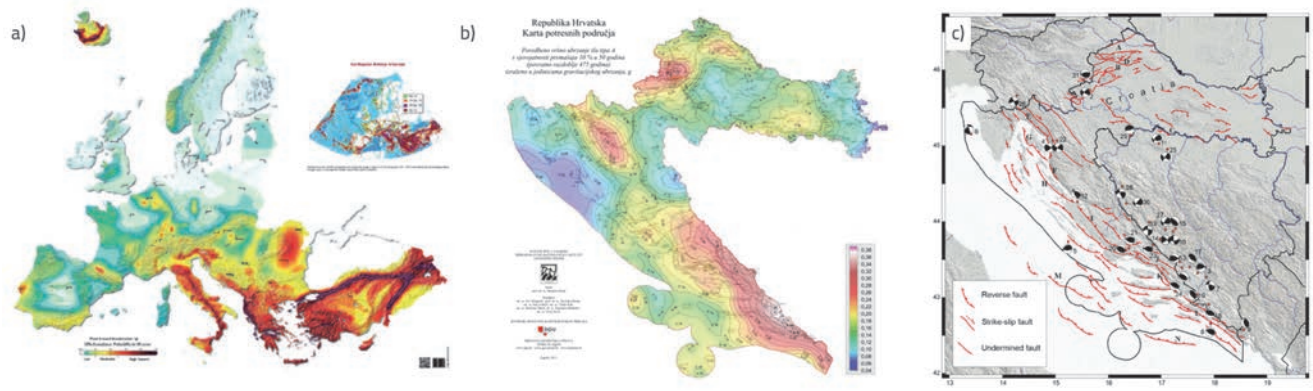
2. Metodologija

Kao uvod u pregled aktivnosti na procjenama rizika u Hrvatskoj ukratko će se definirati osnovni pojmovi i opisati uobičajena metodologija na osnovi kratkog pregleda stanja u državi, ali i osvrta na relevantna istraživanja u svijetu. Općenito se pojam rizika široko koristi i različito definira, a i pojam rizika od potresa ima različite definicije od različitih ustanova poput EERI (eng. *Earthquake Engineering Research Institute*), UNISDR (eng. *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*) i slično. Ipak, rizik od potresa najčešće se definira kao kombinacija samih posljedica događaja i odgovarajuće vjerojatnosti njihove pojave [18]. Procjena seizmičkog rizika najčešće polazi od očekivanog oštećenja postojećeg fonda građevina temeljem kojeg se proračunavaju moguće opasnosti za ljudsko zdravlje i život te odgovarajući financijski gubici zbog nastale štete [19]. Zato je kad se uspostavlja model seizmičkog rizika iznimno važno obuhvatiti, osim seizmičke opasnosti/hazarda (primjerice vjerojatnost premašivanja određene razine podrhtavanja tla uslijed mogućih potresa u budućnosti), izloženost izgrađenog okoliša (primjerice popis imovine izložene hazardu) te pridružiti odgovarajuću razinu fizičke oštetljivosti (eng. *vulnerability*) pojedinim tipovima građevina (vjerojatnost oštećenja ili gubitaka uslijed određene razine seizmičkog intenziteta). Znači, seizmički rizik se može kvantitativno izraziti u obliku konvolucije individualnih faktora (slika 3.): seizmičkog hazarda, izloženosti i oštetljivosti [20].

Slika 3. Faktori koji čine rizik od potresa [20]

2.1. Seizmički hazard (opasnost)

Seizmički hazard ili potresna opasnost obuhvaća potencijalno razorne učinke potresa (primjerice podrhtavanje tla, likvefakcija, odroni i slično) na promatranoj lokaciji [21]. Izražava se statističkom vjerojatnošću premašivanja odabranog parametra



Slika 4. Očekivana horizontalna vršna ubrzanja tla tipa A (čvrsta stijena) za povratno razdoblje od 475 godina: a) na karti hazarda Europe [23]; b) na karti potresnih područja u Hrvatskoj [24]; c) Linije rasjeda u Hrvatskoj [5]

u zadanom razdoblju, a može se procjenjivati deterministčkim i probabilističkim postupkom. Za parametar kojim se opisuje potresno djelovanje stručnjaci najčešće primjenjuju očekivano horizontalno ubrzanje tla (jednostavno povezuju sa silama koje djeluju na građevinu tijekom potresa), a u javnosti se najčešće primjenjuju različite ljestvice intenziteta potresa (već spomenuta MCS ili Richterova ljestvica).

Uzroci potresa se najčešće povezuju s globalnom teorijom tektonskih ploča, što se u Hrvatskoj veže s podvlačenjem jadranske mikroploče pod dinaride, kao posljedice kretanja afričke ploče u odnosu na euroazijsku [22] čime se definira mediteransko-transazijski pojas visoke seizmičke aktivnosti (slika 4.a). Prikazana karta hazarda je rezultat istraživanja EU projekta SHARE (2013.) kojem je cilj bio definiranje euromediteranskog modela seizmičkog hazarda (ESHM13) [23] na temelju povijesnih potresa i probabilističkih procjena za regiju. Istraživanja seizmičnosti su kontinuirana pa se mogu istaknuti i projekti koji su prethodili GSHAP (1999.) i SESAME (2002.), ali i projekt u kojem se nastavljaju - SERA (detaljnije u 3.9). Treba istaknuti i NATO projekt vezan za ovo područje: Harmonization of Seismic Hazard Maps in the Western Balkans, BSHAP I-II (2007.-2014.), ali i prije je postojalo nekoliko inicijativa sa sličnom namjerom (detaljnije u 3.1).

Za procjene rizika u Hrvatskoj uglavnom se koriste karte seizmičkog hazarda [24] izrađene na temelju opažene seizmičnosti na teritoriju Hrvatske i susjednim područjima koristeći raspoložive podatke o potresima (povijesni potresi i uređajima zabilježeni potresi) i rasjedima. Složeni seizmički proračuni i karte potresne opasnosti u Hrvatskoj izrađeni su u Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, obrazovnoj i znanstvenoistraživačkoj ustanovi koja je središte izvrsnosti o pitanjima seizmičkog hazarda u Hrvatskoj. Karte su objavljene 2011. godine (dostupno na adresi: http://seizkarta.gfz.hr) te uvrštene u hrvatski Nacionalni dodatak europskih norma za projektiranje potresne otpornosti konstrukcija (Eurokod 8, HRN EN 1998-1:2011/NA:2011). Na slici 4.b jedna od karata potresnih područja koja prikazuje horizontalna vršna ubrzanja (a_{gR}) tla tipa A (čvrsta stijena) za povratno razdoblje od 475 godina (vjerojatnosti premašaja 10 % u 50 godina).

Prikazane karte na slici 4.a i 4.b probabilistički definiraju hazard obuhvaćajući sve moguće izvore potresa (primjerice različitih rasjeda – slika 4.c) i njihov utjecaj na lokaciju, a takozvanim deterministčkim pristupom definirali bi se pojedinačni scenariji, odnosno izvor potresa (primjerice neki od povijesnih potresa ili maksimalni vjerojatni događaj). Probabilistički pristupi najčešći su prilikom usporedbi različitih područja izloženih potresu (primjerice regija) ili pri usporedbi s drugim rizicima (primjerice poplavama) analizirajući parametre različitih gubitaka [25]. Deterministički pristup češće se primjenjuje za pripremu interventnih službi, podizanje svijesti o riziku od potresa i slično. Neovisno o različitim pristupima koji se mogu kombinirati i koji moraju biti usklađeni, najvažnije je primjenjivati sve raspoložive podatke (multidisciplinarnost) jer je kvaliteta i pouzdanost procjene hazarda usko povezana s kvalitetom i pouzdanosti ulaznih podataka. Stoga je na razini države bitno predvidjeti i osigurati kontinuirana i adekvatna ulaganja u seizmološka, geološka, geotehnička i seizmotektonska istraživanja kako bi se hazard što preciznije (pouzdanije) definirao. Primjerice, povećanjem gustoće mreže seizmografskih i akcelerografskih postaja znatno bi se unaprijedila razina poznavanja seizmičnosti, a detaljnija karta rasjeda omogućavala bi identifikaciju aktivnih i neaktivnih rasjeda te procjenu seizmotektonskog potencijala rasjeda. Bitno je istaknuti da prikazane karte (slika 4.a i 4.b) definiraju potresnu opasnost na razini osnovne stijene koja vrlo često nije na površini već se iznad nje nalaze površinski slojevi tla (debljine nekoliko metara do nekoliko stotina metara) koji pak mogu značajno modificirati potresno djelovanje. Mikrozoniranjem (upravo se mjestimično provodi [27]) omogućilo bi se preciznije definirati utjecaj površinskih slojeva tla iznad osnovne stijene na potresno djelovanje i tako bi potresna opasnost bila utvrđena na površini, što bi značajno smanjilo nepouzdanosti i povećalo kvalitetu procjena rizika. Također, valja napomenuti kako je praksa u svijetu da se ovakve karte potresnih područja (slika 4) periodički revidiraju i nadopunjavaju otprilike svakih 5 godina na temelju novih spoznaja o seizmičnosti, što znači da karte polako postaju zastarjele. Primjerice, karta potresnih područja (slika 4.b) napravljena je na temelju više od 40.000 potresa, a od 2011. se u prosjeku u Hrvatski katalog potresa [28] godišnje unosi više od

10.000 potresa. Revidirana karta potresne opasnosti zasigurno bi pridonijela povećanju pouzdanosti procjene seizmičkog hazarda na nivou osnovne stijene. Brojne su dodatne aktivnosti koje je potrebno predvidjeti, poput odabira reprezentativnih atenuacijskih relacija [26], izrada modela seizmičnosti i slično, posebice zato što sva postojeća istraživanja jasno svrstavaju Hrvatsku u jednu od ugroženijih država u Europi. Ipak, unatoč svemu, hazard (opasnost) možemo smatrati relativno dobro definiranim u odnosu na ostale faktore seizmičkog rizika (slika 3) u državi.

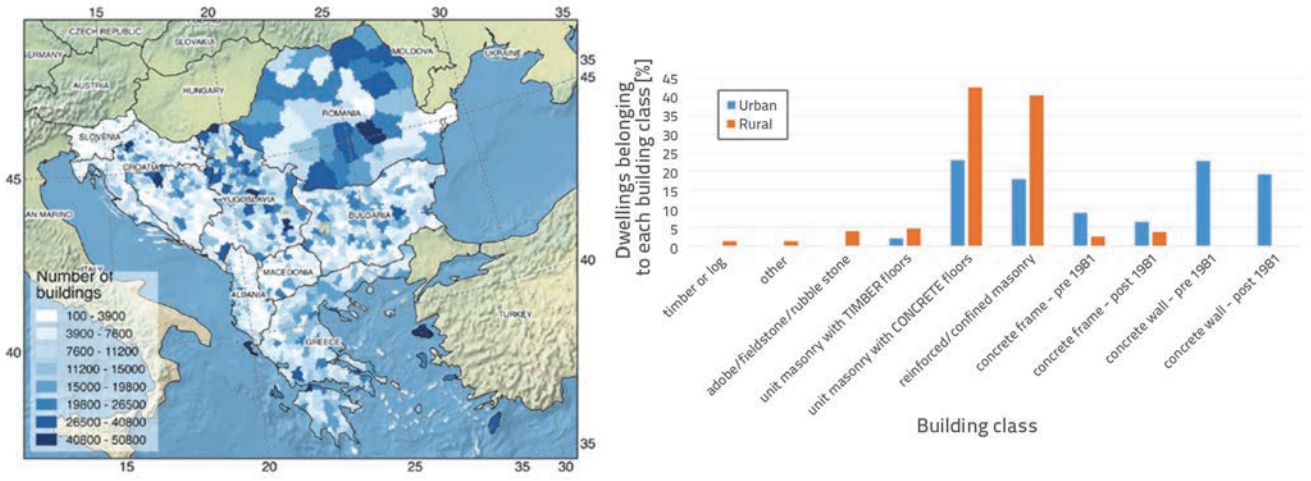
2.2. Izloženost fonda građevina

Izloženost se može definirati kao razmjer ljudske aktivnosti (primjerice prisutnost građevina) u područjima izloženim seizmičkom hazardu. Najvažniji dio podataka o izloženosti odnosi se na popis postojećih zgrada (fond) koji značajno doprinosi društvenom i ekonomskom riziku [29]. Na popis zgrada se veže popis stanovnika, način korištenja (stambene, industrijske, kritična infrastruktura itd.), trošak zamjene zgrada (temelj proračuna financijskih gubitaka) i slično. Fond zgrada se uobičajeno opisuje odabranom taksonomijom pomoću koje se pojedine značajke (primjerice godina izgradnje, materijal, konstrukcijski sustav, dimenzije, visina, katnost, pozicija u bloku, nastanjenost i drugo), obuhvaćaju na ujednačen način, tako da se može provesti jednoznačna klasifikacija.

Pregledom svjetskih istraživanja može se ustanoviti da države uglavnom razvijaju svoju taksonomiju ovisno o specifičnoj tipologiji gradnje u pojedinoj državi, a često su vezane i za police osiguranja. Među najpoznatijim je US FEMA HAZUS [30] za koji se može reći da je postavio standarde, u južnoj Americi se koristi CAPRA, RiskScape na Novom Zelandu, ER2 u Kanadi [31] i slično, a mora se spomenuti i World Housing Encyclopedia (WHE) [32]. Za područje Europe je nužno istaknuti RISK-UE projekt [33] i inicijativu GEM (Global Earthquake Model) koja razvija globalno primjenjiv sustav za opis zgrada (GEM Basic Building Taxonomy) za sve države [34]. Unutar GEM inicijative za klasifikaciju se koristi 13 osnovnih atributa, a razvijena je i aplikacija koja se primjenjuje prilikom pregleda zgrada. GEM platformi je cilj globalna primjenjivost i kontinuirani rad na svim komponentama rizika (detaljnije u nastavku), ali i nekim od ostalih rizika (poplave, uragani, požari i slično).

Definiranje izloženosti u Europi je bio i cilj projekt NERA (Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation) kojim je zahvaćeno i područje Hrvatske [35]. U projektu su prikupljani svi dostupni podaci (primjerice statistički podaci o stambenim jedinicama, podaci iz katastra, financijska izvješća i slično), a pokazalo se da su podaci za područje Hrvatske vrlo manjkavi ili nedostupni. Stoga se klasifikacija i zastupljenost tipova građevina (slika 5) napravila pregledom Google Street View aplikacije i temeljem upitnika koje su ispunjavali hrvatski građevinski stručnjaci. U konačnici su podaci sistematizirani i prikazani na jedinstven način kroz Global Exposure Database [36, 37] koristeći GEM taksonomiju. Inicijativa prikupljanja podataka za Hrvatsku je nastavljena i u nešto sveobuhvatnijem projektu SERA u kojem sudjeluju i stručnjaci iz Hrvatske (detaljnije u 3.9).

Nažalost, spomenutim inicijativama na globalnoj razini nedostaje potpora lokalne razine koja bi omogućila osnovne podatke poput broja zgrada do znanja o lokalnim posebnostima. Općenito se može zaključiti da je u Hrvatskoj izloženost vrlo slabo definiran parametar, odnosno da nedostatak baza s karakteristikama postojećeg fonda građevina predstavlja ozbiljnu prepreku na putu prema pouzdanijoj ocjeni seizmičkog rizika. Štoviše, rad na definiranju izloženosti je gotovo potpuno zanemaren pa zasad postoje samo pojedinačne inicijative poput one u Zagrebu (poglavlje 3.5) i Osijeku (poglavlje 3.6) gdje se u suradnji sa sveučilištima odnosno građevinskim fakultetima provode istraživanja i klasifikacija stambenog fonda. Kao primjer se može izdvojiti karta (slika 6.a) gdje je postojeći fond zgrada u Zagrebu grubo kategoriziran (podijeljen) s obzirom na karakteristične tipove građevina (nosivih konstrukcija), način



Slika 5. Rezultati iz projekta NERA: a) Broj stambenih građevina dobivenih iz nacionalnih statističkih podataka, b) Zastupljenost stambenih jedinica po tipovima građevina u Hrvatskoj prema procjeni stručnjaka [35]

Slika 6. a) Područja karakterističnih tipova građevina u gradu Zagrebu s izdvojenom karakterističnom građevinom [8]; b) Dijagram rasta grada Zagreba [39]

gradnje, razdoblja izgradnje (slika 6.b) i slično [38]. Takvi podaci su vrlo bitni jer se tijekom povijesti način gradnje mijenjao ovisno o razvoju tehnologija građevinskih konstrukcija, spoznajama o karakteristikama tla, urbanističkim spoznajama o uređivanju prostora, potrebama za građevnim prostorom i slično. Unutar grube kategorizacije razvoja grada napravljeno je i detaljnije razvrstavanje po karakterističnim tipovima zgrada (primjerice Jugomont JU-60 - slika 6.a, zgrade izgrađene tunelskom oplatom, stambeni blokovi i slično) tijekom ažurirane procjene rizika (detaljnije u 3.8). Tada je definirano 14 karakterističnih tipova, a unutar Studije za saniranje posljedica potresa (poglavlje 3.5) napravljena je još detaljnija kategorizacija na 42 tipa. Osim navedenog, još je jedino za grad Osijek napravljena kategorizacija na 15 tipova (detaljnije u 3.6), a u pravilnicima propisanim procjenama rizika od katastrofa (detaljnije u 3.3) uglavnom se radi vrlo gruba podjela do 5 tipova.

Nažalost, pojedinačni napori teško mogu nadomjestiti što se unutar statističkih podataka ne obrađuju podaci o konstrukcijskim sustavima građevina (nisu predviđeni ni u novom popisu stanovništva 2021. godine). Štoviše, i oni dostupni općeniti podaci (godina izgrađenosti, katnost, kvadratura i slično) odnose se na stambene jedinice, a ne na građevine. Bitno je istaknuti i neke specifičnosti za Hrvatsku poput vrlo slabo dokumentiranih rekonstrukcija koje znatno utječu na ponašanje konstrukcije pri djelovanju potresa (primjerice uklanjanje zidova prizemlja u prodajnim prostorima). Također, treba istaknuti velik broj nezakonito izgrađenih ili rekonstruiranih zgrada (u Hrvatskoj je zaprimljeno više od 900.000 zahtjeva za legalizaciju), što nije uobičajeno u EU.

Zasad u Hrvatskoj postoji nekoliko aktivnih projektnih prijedloga od kojih se očekuje da pokrenu trenutačnu situaciju (detaljnije u poglavlju 4.). Možda najznačajnija inicijativa je vezana za klasifikaciju zgrada za grad Zagreb u obliku pilot-projekta za cijelu Hrvatsku. Sve inicijative imaju istu poveznicu, a to je sustavna izrada kvalitetne baze podataka s karakteristikama fonda postojećih građevina. Nisu posebice isticane građevine kritične infrastrukture koje predstavljaju dodatni veliki problem i često nisu obuhvaćene analizom stambenog fonda jer su specifične te se najčešće usmjeravaju na pojedinačne analize. Može se zaključiti da je nedostatak pouzdanih podataka o fondu građevina jedan od najvećih izazova u procjenama rizika od potresa jer predstavljaju ključni element (ulazni podatak) za procjene [8, 10].

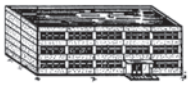
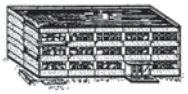
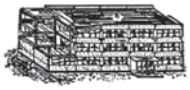
2.3. Fizička oštetljivost izloženih građevina

Fizička oštetljivost se može definirati kao podložnost izloženih građevina učincima potresa (oštećenjima), a cilj njene procjene je odrediti vjerojatnost pojave zadane razine oštećenosti kod određenog tipa građevine zbog djelovanja potresa. Danas je mogućnost njenog kvantificiranja prepoznata kao vrlo značajna za određivanje pouzdanih modela procjene ekonomskih i društvenih gubitaka zbog budućih potresa [19]. U suvremenim procjenama rizika najčešće se razina fizičke oštetljivosti građevina opisuje pomoću krivulja oštetljivosti (engl. Vulnerability curves), često definiranih kao vjerojatnost gubitaka za određenu razinu djelovanja potresa, i/ili pomoću krivulja vjerojatnosti oštećenja često zvanih krivulje ranjivosti (engl. Fragility curves) koje označuju vjerojatnost prekoračenja određenih graničnih stanja, npr. fizičkih oštećenja, za određenu razinu djelovanja potresa. Krivulje oštetljivosti se mogu odrediti iz krivulja vjerojatnosti oštećenja povezujući očekivana fizička oštećenja zgrada s nastalom štetom (primjerice materijalnom) upotrebom funkcija posljedica (opisuju vjerojatnosti gubitaka koji su ovisni o stanju oštećenja).

Tijekom povijesti su se razvile različite metode za procjenu fizičke oštetljivosti koje se mogu podijeliti na empirijske i analitičke (oba pristupa se mogu upotrijebiti i u različitim hibridnim metodama) te pristup baziran na inženjerskoj procjeni stručnjaka. Metode procjene oštetljivosti uglavnom modeliraju oštećenje na diskretnoj ljestvici oštećenja uobičajeno koristeći tri do šest kategorija [40, 41]. Najčešće je korištena EMS98 ljestvica [42] s kategorijama oštećenja od I do V (tablica 1.), pri čemu se vrlo grubo definiraju oštećenja konstrukcijskih i nekonstrukcijskih elemenata te opasnosti za sigurnost korisnika (opisi oštećenja u tablici su skraćeni).

U empirijskim postupcima često se upotrebljavaju ljestvice (tablice, matrice i slično) oštećenja temeljene na statističkim podacima raspoloživim zahvaljujući pregledima i istražnim radovima nakon razornih potresa. Postupni razvoj empirijskih metoda obuhvaćao je primjerice matrice vjerojatnosti (slika 7.a) oštećenja [43, 44], indekse oštetljivosti [45, 46] te kontinuirane

Tablica 1. Kategorije oštećenja prema EMS98 ljestvici [42]

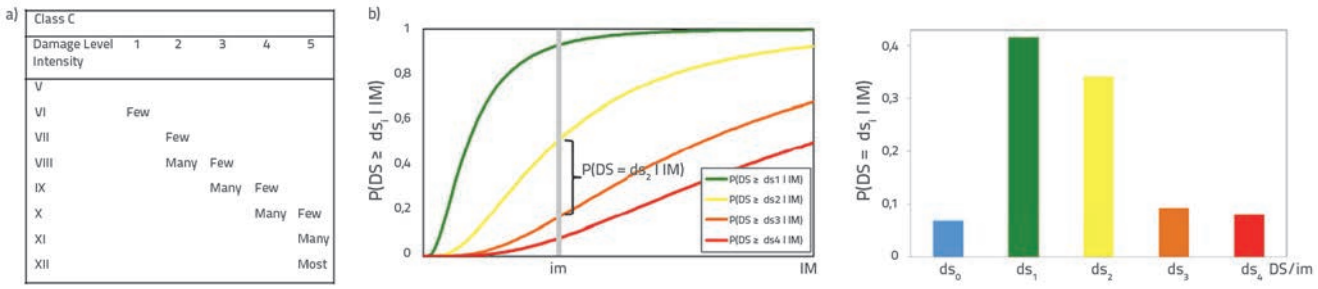
Kategorizacija	I	II	III	IV	V
	Blago oštećenje	Umjereno oštećenje	Značajno oštećenje	Vrlo teško oštećenje	Otkazivanje
AB					
zidane					
opis	zanemarivo konstrukcijsko oštećenje i blago nekonstrukcijsko oštećenje	blago konstrukcijsko. oštećenje i umjereno nekonstrukcijsko oštećenje	umjereno konstrukcijsko oštećenje i teško nekonstrukcijsko oštećenje	teško konstrukcijsko oštećenje i vrlo teško nekonstrukcijsko oštećenje	vrlo teško konstrukcijsko oštećenje

krivulje oštetljivosti utemeljene na podacima o oštećenjima [47, 48] i sustavnim pregledima [49]. Slika 7.a prikazuje primjer kvalitativnog opisa broja oštećenih građevina ("Few" – "neke"; "Many" – "mnoge"; "Most" – "većina") za pet razina oštećenja (1 - 5) ovisno o intenzitetu potresa (V – XII) koji je prema EMS-98 ljestvici pridružen kategoriji oštetljivosti C (primjerice to mogu biti zgrade s nearmiranim zidem koji su dobro povezani AB pločom, inače je A – najveća, F - najmanja ranjivost).

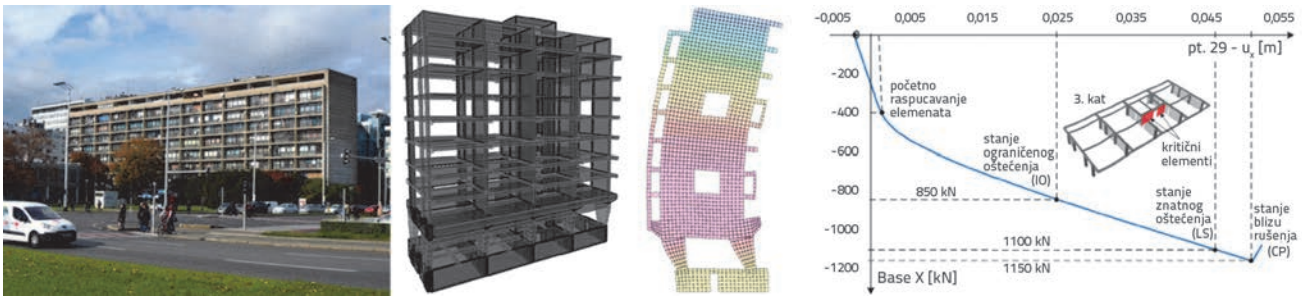
U analitičkim postupcima ljestvica oštećenja se odnosi na mehanička svojstva povezana s graničnim stanjima zgrada (primjerice kapacitet međukatnog pomaka), polazeći od numeričkih modela za simulaciju seizmičkog odziva konstrukcija na povećane razine gibanja temeljnog tla. Takvi pristupi obuhvaćaju primjerice analitički izvedene krivulje ranjivosti i matrice vjerojatnosti oštećenja [50, 51], metode utemeljene na mehanizmu sloma [52], metode utemeljene na spektru kapaciteta [43] i metode potpuno utemeljene na pomacima [53]. Slika 7.b prikazuje primjer krivulja vjerojatnosti oštećenja za četiri stanja oštećenja uključujući histogram oštećenja za intenzitet potresa (*im*). Stanja oštećenja su definirana ds_0 = nema oštećenja, ds_1 = blago oštećenje, ds_2 = umjereno oštećenje, ds_3 = blizu sloma, ds_4 = slom prema [54]. Svakom krivuljom određena je vjerojatnost dostizanja određene razine oštećenjosti ovisno o promatranom intenzitetu potresnog djelovanja. U prikazanom primjeru za odabrani intenzitet potresa (siva linija) vjerojatnost je oko 7 % da neće biti oštećenja (plavi stupac), oko 42 % zgrada da će biti umjerena oštećenja (zeleni stupac), oko 34 % da će biti umjerena oštećenja (žuti stupac), oko 8 % da će biti vrlo teško oštećenje (narančasti stupac) te oko 9 % da će doći do sloma (crveni stupac) - udaljenosti između dviju susjednih krivulja.

Treba napomenuti da djelovanje potresa može biti opisano različitim mjerama intenziteta kao što su vršno ubrzanje/brzina/pomak tla te spektralno ubrzanje/brzina/pomak. Krivulje se uglavnom opisuju funkcijom lognormalne distribucije vjerojatnosti, iako ta distribucija nije nužno najprikladnija u svim slučajevima. Detaljne smjernice za razvoj krivulja vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti analitičkim pristupom mogu se naći u [54], a sistematizacija i kritički osvrt na dobivanje krivulja u [55, 56].

Iz priloženog se može uočiti da postoji mnogo različitih pristupa i metodologija za procjenu fizičke oštetljivosti građevina, pa je pri odabiru važno razmotriti uvjete u gradu/regiji/državi za koji se uspostavlja model rizika, posebice vodeći računa o lokalnom fondu građevina, ali i najnovijim spoznajama o hazardu promatranog područja te postojećim podacima o prošlim potresima. Analitički pristup ocjenjivanju ranjivosti ima veliku prednost u tome što je neovisan o dostupnosti podataka o oštećenjima nakon potresa. S obzirom na to da su u Hrvatskoj, unatoč relativno velikoj seizmičnosti, dostupni



Slika 7. a) Primjer matrice oštećenja [1], b) Primjer krivulja vjerojatnosti oštećenja (ranjivosti) za razne kategorije oštećenja [54]



Slika 8. Primjer detaljne analize karakteristične građevine [64]

podaci o oštećenjima zbog potresa prilično ograničeni, primjena suvremenih analitičkih postupaka za ocjenjivanje ranjivosti čini se prikladnim i učinkovitim odabirom za domaća istraživanja seizmičkog rizika i procjene gubitaka zbog potresa [1].

Bitno je istaknuti da se opisane metode uglavnom primjenjuju za određenu tipologiju (više sličnih zgrada) koja se najčešće kategorizira po materijalu (primjerice nearmirano zide, armiranobetonske, čelične i slično), konstrukcijskom sustavu (primjerice zidni, okvirni, dvojni i slično) i broju katova (primjerice 1 kat, 2 kata, 3-5 katova, više od 6 katova i slično), a ovisno o dostupnim podacima kategorizacija može biti i detaljnija (primjerice meki prvi kat). U prethodnom poglavlju je istaknut primjer kategorizacije u gradu Zagrebu na 42 tipa, a primjeri krivulja vjerojatnosti oštećenja za odabrane tipove nosivih sustava su prikazani u poglavlju 3.8.

Formiranje baze krivulja oštetljivosti za pojedinu državu važno je za pouzdanije procjene rizika, pa je zato bitno istaknuti inicijative koje uključuju sistematizaciju raspoloživih krivulja (uključujući ''upute'' za njihovo kreiranje) u obliku primjenjivih baza podataka poput HAZUS, GEM, ER2 i slično (spomenute i u prethodnom poglavlju). Nažalost, nije moguće potpuno iskoristiti navedene baze s obzirom na primjenjivost odnosno prilagodbu tradiciji i kulturi gradnje na pojedinom području. Potrebni podaci su umnogome vezani za lokalne specifičnosti pojedine države ili regije, odnosno na način gradnje tijekom povijesti (kvaliteta gradnje, specifične građevine itd.), promjene propisa, dostupne materijale, lokalne uvjete tla itd. Očito je da se u Hrvatskoj nastavno na istaknute probleme s definiranjem izloženosti izravno naslanjaju problemi procjene oštetljivosti postojećeg fonda građevina, odnosno s nepouzdanim ulaznim podacima vrlo je teško procijeniti očekivano ponašanje građevine.

Za europski prostor se mora istaknuti projekt SYNER-G [57] u kojem je sistematiziran napredak u razvoju baza i metodologija za procjene oštetljivosti uključujući stambeni fond, kritičnu infrastrukturu, promet itd. Krivulje oštetljivosti su se istraživale još u bivšoj državi [58], a sada se najviše istražuju na sveučilištima u Osijeku i Zagrebu. S obzirom na sličnosti fonda građevina, mogu se iskoristiti i istraživanja nama susjednih država poput Italije, Slovenije, Bosne i Hercegovine, Sjeverne Makedonije, Bugarske i Turske [59-63]. Kompletiranje baze krivulja oštetljivosti za pojedinu državu dugotrajan je i kontinuirani proces kojemu treba pristupiti cjelovito uzimajući u obzir (povezujući) i ostale komponente seizmičkog rizika.

Još jednom je važno istaknuti da je opisanim postupcima vrlo teško obuhvatiti konstrukcije kritične infrastrukture (primjerice inženjerske građevine koje se u potresu ponašaju bitno drukčije od zgrada) i koje najčešće zahtijevaju individualan pristup prilagođen potrebama (primjerice nužnost funkcioniranja poslije djelovanja potresa). Također, nije posebno naglašeno, ali uobičajeni proces dobivanja krivulja oštetljivosti se najčešće svodi na idealizirane analize sustava s jednim stupnjem slobode, što je s inženjerskoga gledišta vrlo teško primjenjivo na složene konstrukcijske sustave. To su potvrdili i postojeći rezultati detaljnih eksperimentalnih i numeričkih analiza za odabrane karakteristične građevine grada Zagreba [64, 65], štoviše, upozorili su na česta odstupanja u odnosu na preliminarne procjene ili pojednostavljene metode/modele. Detaljne analize obično uključuju složene prostorne modele te geometrijske i materijalne nelinearnosti, čime se može detektirati mehanizam postupnog gubitka nosivosti konstrukcije (granična stanja) i najslabije komponente u građevini (slika 8.). Naravno, detaljni pristup analizama zgrada nije primjenjiv za analizu cijelog fonda građevina (dugotrajan), ali rezultati za karakteristične građevine imaju široku mogućnost primjene poput dobivanja krivulja oštetljivosti, analizu složenih konstrukcijskih sustava građevina kritične infrastrukture, primjenu karakterističnih tipova seizmičkih pojačanja za pojedini karakteristični tip građevine uz brojne tangencijalne primjene poput suradnje s interventnim postrojbama (detaljnije u 3.5).

Definiranjem faktora i procjenom seizmičkog rizika, cilj je odrediti negativne utjecaje potresa odnosno gubitke, socijalne ili ekonomske što je u konačnici i okidač za strateška djelovanja. Određivanje potencijalnih gubitaka vežemo za oštećenja izloženih građevina (krivulje oštetljivosti) jer u većini razornih potresa glavni uzroci gubitaka ljudskih života jesu oštećenja, odnosno djelomično ili potpuno rušenje građevina. U prošlom stoljeću prosječno 75 % smrtnih slučajeva zbog posljedica potresa povezano je upravo s odzivom građevina, a većina žrtava bilo je povezano s rušenjem zidanih zgrada [66] koje u Hrvatskoj zauzimaju veliki postotak postojećeg fonda građevina. Međutim, statistički podaci upozoravaju i na porast broja žrtava u armiranobetonskim konstrukcijama, koje su u novije vrijeme učestalo predstavljale prvi izbor pri određivanju nosivog sustava, a u slučaju rušenja mogu izazvati i teže posljedice od zidanih konstrukcija [20]. Ističe se problem odstupanja od suvremenih načela projektiranja seizmičke otpornosti (pitanje

duktilnosti, mekog prvog kata, tlocrtne nesimetrije, nepovoljnih rekonstrukcija i slično), što se također može povezati sa situacijom u Hrvatskoj. Povezanost broja ljudskih žrtava s brojem vrlo oštećenih građevina može se dobiti iz iskustava velikog broja potresa u prošlosti [66] ili temeljem različitih modela koji obuhvaćaju niz parametara ovisnih o tipu građevine, primjerice ukupni broj ljudi koji boravi u građevini, postotak ljudi koji se nalazi u građevini u trenutačku potresa, postotak ljudi koji će ostati zarobljen u građevini, raspodjela ozljeda za slučaj rušenja građevine, postotak smrtnosti nakon rušenja i sl. [67-69].

Direktni troškovi obnove građevina ili uklanjanja ruševina i ponovne izgradnje izravno ovise o raspodjeli oštećenja nakon potresa te se mogu izraziti omjerom troškova potrebnih popravaka i troškova potpune zamjene građevine koji se primjenjuju na postotak građevina u svakoj pojedinoj kategoriji oštećenja. Vrijedni rezultati su dobiveni istraživanjima postojećeg fonda građevina u Turskoj [70], a često se primjenjuje standardizirana američka metodologija za procjenu gubitaka (od potresa, poplava i orkanskog vjetra) HAZUS [30]. Procjena ukupnih gubitaka uključuje i indirektne gubitke (primjerice zastoji u proizvodnji, troškovi zbrinjavanja ljudi i slično) za čiju procjenu su potrebne izrazito složene ekonomske analize [71] koje uključuju brojne parametre što se neće ovdje opisivati.

Zaključno, mnogo je izazova pred Hrvatskom u vezi s procjenama oštetljivosti, ali i s ostalim komponentama procjena rizika, pa je stoga iznimno važno da se aktivnosti što prije značajnije pokrenu. Grubo upozorenje može biti primjer grada Zagreba gdje se oko trećine stambenog fonda izgradilo do 1964. godine pri čemu prilikom projektiranja gotovo da nisu uzimana u obzir potresna djelovanja. Dodatnih više od pola stambenog fonda izgrađeno je od 1964. do 2013., pri čemu su analizirane vrijednosti horizontalnih sila od potresnog djelovanja bile i nekoliko puta manje nego što su propisane danas. Nisu potrebne detaljne analize da se istakne velika ugroženost Zagreba, ali i Hrvatske – posebice urbanih središta. Ipak, pouzdane procjene mogućih gubitaka zbog potresa od iznimne su važnosti za donošenje i provedbu strategije ublažavanja rizika, pa je to od naročitog interesa za državne vlasti, ali jednako tako i za inženjere u praksi i društvenu zajednicu [8].

3. Pregled postojećih procjena rizika od potresa u Hrvatskoj

Nastavljajući se na pregled stanja istraživanja, opisanu metodologiju i istaknute manjkavosti, ovdje će se prikazati kronološki pregled aktivnosti vezanih za procjene rizika od potresa u Hrvatskoj. Osnovni cilj je napraviti pregled postojećeg stanja, istaknuti vrijedne doprinose procjena (i danas korisne), pozicionirati (u odnosu na druge procjene), osvrnuti se na manjkavosti (nepouzdanosti) te definirati smjernice za buduće cjelovite i povezane procjene. U uvodu je već istaknuto da procjene rizika od potresa nisu bile u prioritetima Hrvatske pa su se njima stručnjaci bavili pojedinačno i po potrebi. Sada se u Hrvatskoj susrećemo s različitim procjenama rizika uz različite pristupe (metodologije), što u konačnici može biti zbunjujuće za širu zajednicu. Na razini Hrvatske postoje i brojne pojedinačne inicijative koje obrađuju problematiku procjena rizika iz različitih aspekata, a na globalnoj razini Hrvatska se analizira kroz nekoliko EU projekata, što će se sve pokušati povezati u cjelovitu sliku stanja. S obzirom na to da nije moguće prikazati sve procjene, kao primjer uglavnom će poslužiti grad Zagreb jer za njega postoji najveći broj procjena/analiza, ali i s obzirom na važnost kao glavnoga grada Hrvatske (za društvenu, gospodarsku i političku stabilnost države), vodeći računa o velikoj gustoći naseljenosti i izgrađenosti, uz istovremenu visoku razinu seizmičkog hazarda [8].

3.1. Aktivnosti vezane za rizik od potresa do 1990. godine

Bilo koji povijesni pregled vezan za rizik od potresa nužno je započeti prisjećajući se Andrije Mohorovičića koji je još na početku 20. stoljeća dao niz uputa za povećanje potresne otpornosti zgrada. Također, uočio je nužnost povezivanja seizmologije i potresnoga inženjerstva, a danas smo svjedoci nastavka takve suradnje. Nažalost, slično kao i u mnogim državama tek su potresi u Skopju (1963.), Banja Luci (1969.) i crnogorskom primorju (1979.) [14] značajnije aktivirali sustav bivše države i suočeni s razornim posljedicama potresa, stručnjaci i znanstvenici su intenzivno radili na umanjenju posljedica. Prvi značajni korak je promjena propisa za projektiranje građevina iz 1964. godine [72] u kojem se prvi put značajnije uzima u obzir djelovanje potresa. Međutim, treba napomenuti da su spoznaje o djelovanju potresa na građevine u to doba bile vrlo ograničene (mlada znanstvena disciplina). U idućim godinama potresi sve češće pogađaju mediteranske države što je dovelo do napretka u istraživanjima i još nekoliko promjena u propisima koje su uključivale promjene karata hazarda, ali i postupaka proračuna (primjerice uvođenje duktilnosti) [73].

Nužno je spomenuti i projekte poput *Survey of the Seismicity of the Balkan Region* (UNESCO/UNDP) koji je realiziran 70-ih godina prošlog stoljeća ili projekt *Seismic Risk Reduction in The Balkan Region* (UNDP/UNESCO) implementiran 80-ih godina. U suradnji s američkom National Science Foundation od 1979. do 1985 se radilo na projektu *Building Construction under Seismic Conditions in the Balkan Region* (UNDP/UNIDO), pri čemu je objavljeno niz knjiga, priručnika, radova [74, 75] sumirajući stečena iskustva. Brojna različita istraživanja i publikacije (primjerice upute za pregled građevina nakon potresa) pokrenuli su znanstvenici s ovog područja [76], a treba imati na umu da je u Skopju organizirana prva konferencija o potresima *European Association for Earthquake engineering* (EAEE) 1964. i šesta u Dubrovniku 1978. godine. Općenito se može smatrati da su stručnjaci s ovog područja bili jedni od vodećih za rizik od potresa u Europi, a posebice su bili aktivni članovi Instituta za zemljotresno inženjerstvo i seizmologiju (IZIIS) u Skopju.

Kao pozitivnan primjer treba istaknuti monografiju pod nazivom "Obnova, seizmičko pojačanje i konstruktivna sanacija spomenika

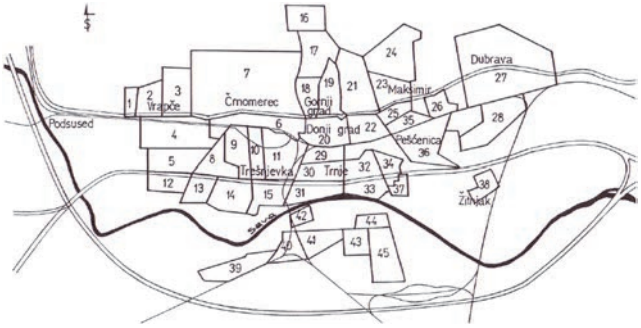
Slika 9. Monografija [77]: a) Karta seizmičkog hazarda, b) Mikrozoniranje stare jezgre, c) Geotehničko zoniranje, d) Kategorizacija oštećenja zgrada

kulture u staroj gradskoj jezgri Dubrovnika" iz 1988. godine [77] koja je izrađena na zahtjev Zavoda za obnovu Dubrovnika s ciljem sistematizacije suvremenih dostignuća u znanosti vezano za problematiku potresa. Autori priloga u monografiji potaknuti iskustvima, nakon razornog djelovanja crnogorskog potresa, sistematizirali su rad na definiranju seizmičkog rizika, izradi seizmičkoga mikrozoniranja, istražnim konstrukcijskim radovima, analizama seizmičke otpornosti, izradi prijedloga seizmičkog pojačanja i slično. Monografija je primjer izvrsnosti, sistematizacije i cjelovitog rješenja, analizirajući sve komponente rizika od analize hazarda, izloženosti (kategorizacije zgrada) do detaljnih analiza oštetljivosti zgrada (slika 9.).

Prva znanstvena knjiga u kojoj su obrađene dotadašnje spoznaje o potresnoj otpornosti zgrada (1963.-1990.) objavljena je 1990. godine (Aničić i sur.) [78], ali situaciju u Hrvatskoj je značajno promijenio Domovinski rat. Svijest o riziku od potresa je pala u drugi plan (logično), a postojeća istraživanja kao da se zaboravljaju. Hrvatska država nije nastavila tradiciju postojanja instituta kao što je IZIIS u Skopju koji bi povezivao aktivnosti vezano za rizik od potresa. Dodatno upozorenje je bio potres u Stonu (1996.), ali s obzirom na razorne posljedice rata, sustav nije reagirao u smislu osvješćivanja i jačanja otpornosti zajednice. Danas su vodeću ulogu u znanstvenim istraživanjima preuzele druge države poput Italije, Turske i Grčke, ali motivacija kao da se ponavlja – bili su suočeni s razornim potresima. Sve navedeno kao da upozorava moraju li se opet doživjeti katastrofalne posljedice razornog potresa da bi se značajnije počeli rješavati problematika rizika od potresa.

3.2. Procjena štete na stambenom fondu i broja žrtava mogućeg budućeg potresa u Zagrebu

Prvo istraživanje objavljeno u Hrvatskoj jest procjena rizika od potresa za grad Zagreb iz 1992. godine (Aničić i sur.) [79] premda je glavnina istraživanja napravljena još 1983. godine, ali nisu objavljena zbog povjerljivosti. Cilj istraživanja je bila procjena šteta na stambenom fondu i procjena stradalih s obzirom na organizaciju sustava, pripreme i definiranje strategije. Veliki početni dio istraživanja odnosi se na opisivanje stanja nakon djelovanja razornog potresa te na upućivanje kako precizne procjene rizika mogu pomoći organizaciji sustava (važno i danas). Napravljen je i osvrt na sve tada dostupne podatke (uključujući seizmičko mikrozoniranje) i definiranje smjernica za budućnost (većina ni do danas nije ispunjena). Za potresnu opasnost korištena je seizmološka karta objavljena 1987. godine za povratno razdoblje od 500 godina, prihvaćena u Pravilniku tek 1990. godine. Štete su predviđene za scenarij potresa intenziteta VIII° MSK-64 ljestvice, maksimalne akceleracije 2,0 m/s² (0,2 g na cijelom području), trajanje potresa 15 sekundi, ne uzimajući u obzir razlike u svojstvima tla, za uže područje grada (10 tadašnjih područnih ureda) s oko 700 000 stanovnika itd. Područje grada je podijeljeno na 45 zona (slika 10.) koje se razlikuju po vremenu izgradnje, broju građevina, broju katova zgrada, konstrukcijskom sustavu i gustoći naseljenosti.



Slika 10. Podjela grada Zagreba na 45 područja [79]

Građevine su s obzirom na vrijeme i način gradnje svrstane u tipove: zidane zgrade, zidane zgrade sa serklažima, armiranobetonske okvirne zgrade, zgrade sa sustavom armiranobetonskih nosivih zidova i armiranobetonske okvirne zgrade s armiranobetonskim nosivim zidovima. Postotak zastupljenosti zgrada određenog konstrukcijskog sustava procijenjen je na osnovi iskustva jer podaci nisu bili dostupni (nažalost još uvijek nisu). Koristeći matrice oštetljivosti za tipove zgrada procijenjena su oštećenja (svrstana u šest kategorija) gdje je svakom sustavu pridijeljen postotak oštećenosti ukupnog broja zgrada. Za usporedbu s ostalim procjenama može se istaknuti da će prema definiranom scenariju biti oštećeno oko 80.000 stambenih jedinica, odnosno kad bi se sve djelomično oštećene stambene jedinice s korekcijskim faktorima pretvorile u potpuno uništene, to bi bilo 11 % stambenog fonda. Za prosječnu veličinu stana od 60 m² i cijenu izgradnje od 1.000 DEM/m², šteta je procijenjena na 1.440.000.000 DEM. Uz pretpostavku da u stambenoj jedinici živi u prosjeku 3,1 osoba, procijenjeno je da će oko 130.000 osoba biti bez uvjeta za život, ali i 13.500

ozlijeđenih te 2.000 poginulih. Općenito se može zaključiti da je opisana analiza gruba (istaknuto i u zaključku istraživanja) i trenutačno zastarjela s obzirom na napredak u znanosti, ali još uvijek se često primjenjuje kao podloga za procjene rizika od katastrofa županija i gradova (sljedeće poglavlje). Općenito može se zaključiti da su procjene napravljene prema tadašnjim znanstvenim istraživanjima i trebale su poslužiti kao dobra podloga i poticaj za nastavak istraživanja. Osim opisane procjene rizika treba istaknuti i radove [80, 81] koji se odnose na procjene seizmičkog rizika za mostove.

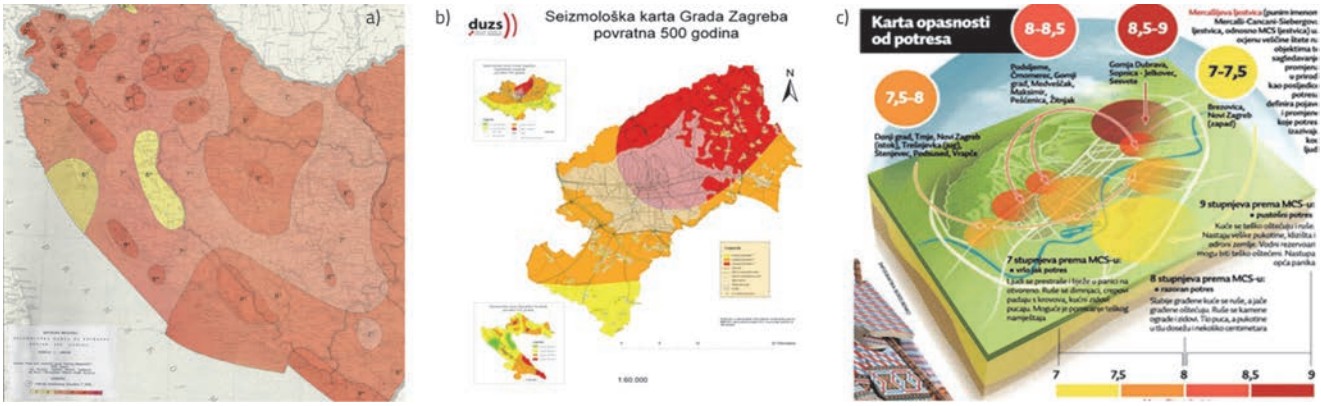
3.3. Procjena ugroženosti stanovništva, materijalnih i kulturnih dobara i okoliša od katastrofa i velikih nesreća od 2008. do danas

Na temelju Zakona o zaštiti i spašavanju (NN 174/04, 79/07, 38/09 i 127/10) te Pravilnika o metodologiji za izradu procjena ugroženosti i planova zaštite i spašavanja (NN 38/08) propisano je napraviti procjene ugroženosti od katastrofa za Hrvatsku, županije, gradove i općine, što je uključivalo i procjene ugroženosti od potresa, a procjene su mogli raditi stručnjaci koje je ovlastila Državna uprava za zaštitu i spašavanje. Novim Pravilnikom o smjernicama za izradu procjena rizika od katastrofa i velikih nesreća za područje Republike Hrvatske i jedinica lokalne i područne (regionalne) samouprave (NN br. 65/16) napravio se iskorak prema usklađivanju sa smjernicama Europske komisije. Pregledom postojećih procjena ugroženosti općenito se može zaključiti da je potres razmatran vrlo grubo zajedno s analizom nekoliko odabranih rizika za razmatrano područje. Najčešće je primjenjivana metodologija opisana u prethodnom poglavlju (ne prate se suvremeni trendovi i nova istraživanja), a razina stručnosti vrlo je neujednačena (stručnjaci različitih struka). Ipak, treba imati na umu postavljene kriterije i ciljeve za koje se ove procjene rade (primjerice planove zaštite i spašavanja).

Slijedi osvrt na postojeće procjene, a kao primjer će se istaknuti rad na procjenama u Uredu za upravljanje u hitnim situacijama Grada Zagreba (za usporedbu s ostalim rezultatima) i procjene za grad Dubrovnik (u 3.6 je istaknut kao jedan od najugroženijih gradova). Kod svih procjena seizmička se opasnost (hazard) uobičajeno definira pomoću dostupnih karata, pa su se za procjene prema Pravilniku iz 2008. godine koristile različite karte poput onih na slici 11. Pojedine novije procjene koriste već istaknutu službenu kartu potresnih područja (slika 4.b) objavljenu 2011. godine, ali nerijetko se još uvijek koriste karte prihvaćene u Pravilniku 1990. godine (primjerice procjena za grad Dubrovnik iz 2016. koristi kartu koja je prikazana na slici 11.a). Utjecaj tla se uglavnom nije uzimao u obzir, a može se jedino istaknuti procjena za grad Zagreb iz 2016. godine gdje je amplifikacija razmatrana prema važećim propisima. Većina procjena sadržava kronološki pregled prošlih potresa u okolici i opće podatke o seizmičnosti područja poput epicentralnih područja, očekivanih intenziteta potresa, svojstva tla što može dati dobar opći dojam.

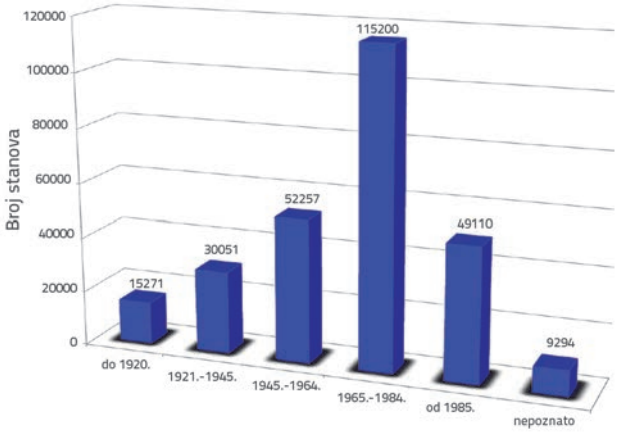
Izloženost građevina unutar procjena najčešće se analizira kroz podjelu stambenih jedinica po razdobljima primjene pojedinih propisa (dostupni statistički podaci – slika 12) na način da se određenom razdoblju pridruži karakteristična tipologija zgrade (primjerice do 1964. su pretežno zidane zgrade i slično). Također, kategorizacija može biti napravljena po tipu konstrukcije unutar razmatrane jedinice (četvrti, gradske zone, općine, grada i slično), pri čemu se procjenjuje postotak zastupljenosti određene tipologije (najčešće iz prostornih planova). Primjerice za grad Dubrovnik (u procjenama iz 2011. i 2016.) korišteno je pet tipova zgrada (opisani u prethodnom poglavlju) razmatranih unutar tri gradske zone. Za grad Zagreb, u procjeni iz 2011. godine, bila je na snazi podjela po gradskim četvrtima (ukupno 17). Novom procjenom iz 2016. godine je grad početno podijeljen na tri područja različite ugroženosti, pri čemu je gradska četvrt Podsljeme istaknuta kao područje najveće ugroženosti, a Brezovica najmanje. Ostalih 15 gradskih četvrti grubo je podijeljeno s obzirom na konstrukcijski sustav (tablica 2.): zidane zgrade s 1-2 etaže (B1), zidane zgrade s 3-6 etaža (B2), AB zgrade s 1-12 etaža (C1), AB zgrade s 13-25 etaža (C2) i razni tipovi zgrada (A), s udjelom pojedinog tipa prema ekspertnoj procjeni i iskustvu.

Za procjene oštećenja gotovo uvijek se koriste matrice oštetljivosti vezane za intenzitet potresa i konstrukcijski sustav



Slika 11. a) Seizmološka karta prihvaćena u Pravilniku 1990.; b) Seizmološka karta grada Zagreba (DUZS, 2010.); c) Karta opasnosti od potresa (stručne službe Grada Zagreba)

poput primjera u prethodnom poglavlju [79] ili primjera iz procjene za grad Zagreb iz 2016. godine (tablica 2.). U matrici se koriste kategorije oštećenja prema EMS ljestvici (stupac 1-3), indeks oštetljivosti DI (engl. *damage index*) u postocima (rasponi prikazani u 4. stupcu) te prethodno opisani konstrukcijski sustavi A, B1, B2, C1 i C2 (u stupcima 5, 6 i 7 su navedeni postoci oštetljivosti po stupnjevima oštećenosti i konstrukcijskim sustavima), a sve za horizontalno ubrzanje od 0,3 g (procjena u prethodnom poglavlju je bila za 0,2 g). Treba istaknuti da vrlo često u procjenama nije naznačena korištena metodologija (primjerice u procjeni za grad Zagreb iz 2011. godine).



Slika 12. a) Broj stanova po razdobljima izgradnje [82]

Dobiveni rezultati su različite detaljnosti ovisno o razmatranim jedinicama samouprave. Primjerice za procjenu ugroženosti od potresa u Hrvatskoj (2013.) može se izdvojiti gruba opisna procjena da je više od 30 % površine, odnosno oko 60 % stanovništva izloženo jačim potresima s očekivanim značajnim posljedicama [1]. Ta je procjena dobivena raspodjelom županija po seizmičkim zonama (slika 11.a) te broja stambenih jedinica i stanovništva po razdobljima primjene propisa. Procjene za županije prikazuju se po gradovima/općinama, a procjene za gradove po gradskim četvrtima ili odabranim zonama što jasno upućuje na vrlo grube rezultate.

Za dojam o razini ugroženosti i usporedbu s ostalim procjenama može se istaknuti da procjena za grad Zagreb iz 2011. godine pretpostavlja urušavanje 2.127 stambenih jedinica (V. kategorija po EMS skali) i razorna oštećenja na 4.379 stambenih jedinica (IV. kategorija). Ukupno se procjenjuje da ne bi bilo za stanovanje 51.865 stambenih jedinica (oko 16,5 % stambenog fonda) i očekuje se oko 3.000 poginulih osoba. Prema procjeni iz 2016. godine, broj potpuno uništenih (nepopravljivih) stanova je 63.743 što je 21 % stambenog fonda, a broj djelomično oštećenih (popravljivih stanova) 39.888 što je 13 % stambenog fonda. Prema prikazanim rezultatima, za oko 168.000 osoba trebalo bi rješavati zbrinjavanje do izgradnje zamjenskih zgrada odnosno cijelih novih naselja, a za dodatne 103.000 osobe trebalo bi riješiti privremeni smještaj. Uz korištenu prosječnu površinu od 70 m^2/stan i cijenu građenja od 1000 €/m^2 (tada procijenjena vrijednost), šteta na stambenom fondu je procijenjena na

Tablica 2. Matrica oštetljivosti [82]

1	2	3	4	5	6		7	
Stupanj oštećenja	**Oznaka boje**	**Kratki opis oštećenja**	**Raspon i središnji indeks oštatljivosti (DI) [%]**	**Nosivi sustav**	**Noisvi sustav**		**Noisvi sustav**	
		Oznaka		A	B1	B2	C1	C2
		Broj etaža		do 2	1-2	3-6	1-12	13-25
				Udio po stupnju oštećenja u ukupnom broju stanova pojedinos nosivog sustava (UU)				
1	zelena	nema ili neznatno	0-5 (2)	5	20	10	15	10
2	zelena	umjereno, zgrada upotrebljiva	6-25 (15)	15	40	35	25	50
3	žuta	jako, zgrada neupotrebljiva ali popravljiva	26-50 (40)	20	30	30	30	20
4	crvena	djelomično rušenje, zgrada neupotrebljiva i nepopravljiva	51-85 (65)	50	5	15	15	10
5	crvena	potpuno rušenje	81-100 (90)	10	5	10	15	10
			Ukupno:	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**

9.035.250.000 €. Za procjenu broja smrtno stradalih osoba primijenjena je metodologija koja uzima u obzir ukupan broj stanova određenog tipa nosivog sustava, udio u ukupnom broju stanova pojedinog tipa nosivog sustava, indeks oštetljivosti za odgovarajući stupanj oštećenosti, procijenjeni broj poginulih (smrtno stradalih) osoba po stanu i prosječan broj osoba po stanu (2,58). Procijenjeni broj poginulih osoba je 5.626 (srednja vrijednost), ranjenih 11.539, a zatrpanih čak 10.632.

Bitno je istaknuti da se u procjenama gotovo uvijek spominju i građevine kritične infrastrukture, ali se najčešće ne analiziraju, odnosno upućuju se na detaljnije analize. U procjeni za grad Zagreb iz 2016. godine iskorištena je preliminarna procjena iz prijedloga projekta [83] (opisanog u poglavlju 4.) koja govori da bi snažan potres mogao prouzročiti veća oštećenja na instalacijama za prijenos plina i električne energije, na telekomunikacijskim građevinama, prometnoj infrastrukturi (ceste, mostovi, vijadukti, nadvožnjaci) te na sustavu za distribuciju vode i slično.

Općenito se može zaključiti da su korištene analize u procjenama vrlo grube i uvelike ovise o pretpostavljenim vrijednostima oslanjajući se na inženjerske procjene i iskustvo stručnjaka. Najveći problem su vrlo površni podaci o konstrukcijama, koje stručnjaci različito obrađuju (kategoriziraju), ali često se u zaključku navodi da je za precizniju procjenu potrebno provesti opsežnija istraživanja. Kao pozitivan primjer treba istaknuti Grad Zagreb, koji ulaže u istraživanja, pa su procjene sve razrađenije i preciznije. Primjerice, procjenom iz 2018. godine (nije korištena kao primjer u ovom poglavlju) obuhvaćena su sva postojeća istraživanja, a dio rezultata bit će istaknut u poglavljima koja slijede.

3.4. Procjena rizika od katastrofa za Republiku Hrvatsku – potres (2015.)

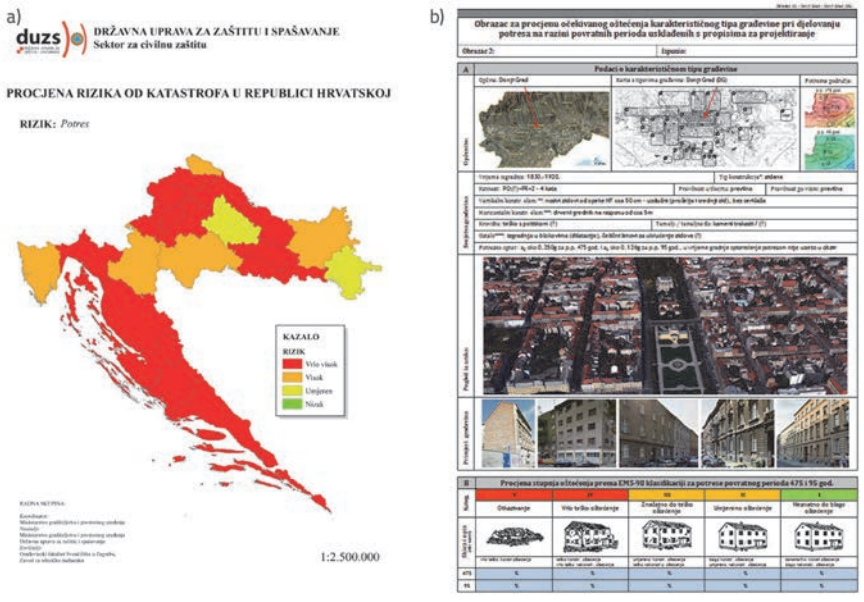
Procjena je napravljena u sklopu postupka izrade Procjena rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj prema *Smjernicama za izradu nacionalne procjene rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj* izdanim od strane Državne uprave za zaštitu i spašavanje (2014. godine) u skladu s *Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management SEC* (2010.) 1626 te HRN ISO 31000 Upravljanje rizikom. Jedan od ciljeva smjernica bila je usporedivost procjena pojedinačnih rizika kako na nacionalnom tako na nivou Europske unije.

Kao glavni izvršitelj procjenu je napravio Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu u suradnji s ostalim izvršiteljima (posebice Prirodoslovno-matematičkim fakultetom Sveučilišta u Zagrebu). Za najgori scenarij je odabrano *Podrhtavanje tla u gradu Zagrebu uzrokovano potresom na razini povratnog razdoblja usklađenog s propisima za projektiranje potresne otpornosti*. Procjena sadržava opsežan opis scenarija unutar kojeg je prikazana cjelokupna slika stanja istraživanja u Hrvatskoj i svijetu. Također, detaljno je opisana suvremena metodologija i priložena je teorijska podloga za svaku od komponenti rizika od potresa, uključujući analizu raspoloživih podataka za svaku komponentu s naglaskom na manjkavosti koje onemogućuju pouzdanije (preciznije) procjene.

S obzirom na brojne nepoznanice, jedna od osnovnih ideja je bila postaviti temelj (usmjeriti) za sve procjene u budućnosti, a može se istaknuti da su dijelovi procjene korišteni za Procjenu ugroženosti grada Zagreba iz 2018. godine. Analize iz obrađenog scenarija iskorištene su i za grubu procjenu rizika od potresa na razini županija (slika 13.a).

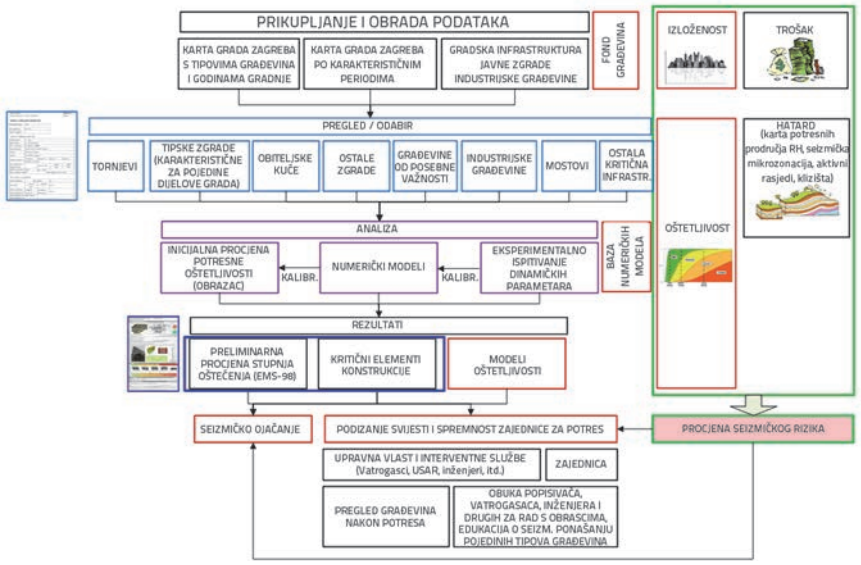
Ključnu manjkavost vezanu za probleme izloženosti građevina (baza podataka o građevinama) pokušalo se nadomjestiti izradom posebnih *Obrazaca za procjenu očekivanog oštećenja karakterističnog tipa građevine pri djelovanju potresa na razini povratnih perioda usklađenih s propisima za projektiranje* (slika 13.b) unutar kojih su sistematizirani svi dostupni podaci (uključujući sve dostupne statističke podatke iz 2011. godine). Obrasci [1] obuhvaćaju analizu karakterističnih tipologija gradnje po gradskim četvrtima odnosno općinama s obzirom na tip konstrukcije, vrijeme izgradnje, razinu potresnog opterećenja (mjerodavnu i onu u vrijeme projektiranja), visinu (katnost), pravilnost u tlocrtu/visini, nosive elemente za horizontalno i vertikalno opterećenje, vrstu temelja/tla i slično. Za definiranje hazarda je korištena Karta potresnih područja Hrvatske (slika 4.b) ne uzimajući u obzir dodatni utjecaj tla.

Analize su napravljene na način da su početne procjene provedene prema EMS-98 klasifikaciji/postupku, a zatim su



Slika 13. a) Gruba procjena rizika za županije, b) Obrasci za procjenu očekivanog oštećenja karakterističnog tipa građevine pri djelovanju potresa na razini povratnih perioda usklađenih s propisima za projektiranje [1]

dopunjene procjenama stručnjaka koji su odabrani s obzirom na znanja i iskustvo u projektiranju takvih i sličnih konstrukcija, a posebice s obzirom na poznavanje specifičnih 'lokalnih' uvjeta (primjerice veliki broj nezakonito izvedenih građevina, rasjeda, klizišta, kvalitetu gradnje, specifičnu tipologiju gradnje i slično) koje EMS-98 ne obuhvaća. Za primjer se mogu izdvojiti rezultati o gradskoj četvrti Podsljeme (istaknuta u 3.3), gdje se od ukupno 8.834 stambene jedinice očekuje 2-10 % kategorije V. (rušenje), 10-20 % kategorije IV (vrlo teško oštećenje), 15-25 % kategorije III. (značajno oštećenje), 20-30 % kategorije II. (umjereno oštećenje) i 30-40 % kategorije I. (bez oštećenja).



Slika 14. Shematski prikaz aktivnosti unutar Studije [84, 85]

Prema dobivenim rezultatima, za sve gradske četvrti napravljena je i procjena očekivanih žrtava (ukupno 8.126 žrtava) i šteta (ukupno 1.706.363.505 eura) prema [69]. Treba istaknuti da su vrijednosti prilagođene zadanim kriterijima (korištene su minimalne vrijednosti) i ne predstavljaju realne troškove koji ovise o brojnim parametrima (starost građevine, vrsta materijala itd.) niti obuhvaćaju specifične građevine (primjerice mostove, građevine kritične infrastrukture itd.).

Općenito se može zaključiti da je opisana analiza još uvijek gruba jer razmatra samo nekoliko tipova građevina po gradskoj četvrti, ali predstavlja iskorak prema analizama izloženosti građevina jer koristi detaljnije podatke o konstrukciji (nosivom sustavu). Zaključno, opisana procjena zadovoljava s obzirom na zadane kriterije (kategorija posljedica), ali je samo početni iskorak prema suvremenim procjenama rizika.

3.5. Studija za saniranje posljedica potresa u Zagrebu (2013.-2019.)

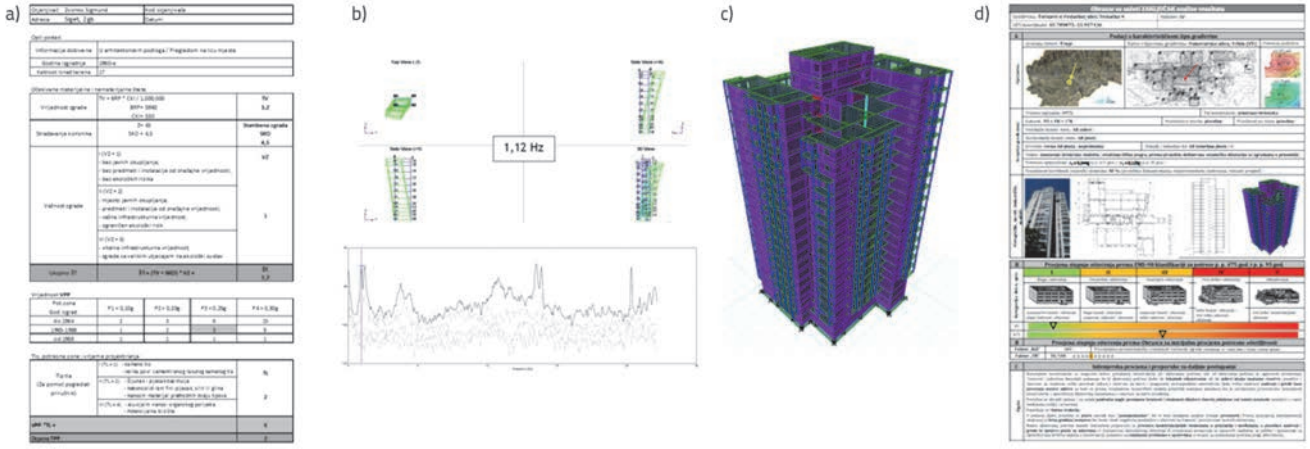
Studija [38] za saniranje posljedica potresa jedna je od pojedinačnih inicijativa, a vezana je za realizaciju projekta br. 11, Ureda za upravljanje u hitnim situacijama gdje se nastoje stvoriti realne pretpostavke za ublažavanje i saniranje posljedica potresa kao jedne od potencijalno najvećih katastrofa koje mogu zadesiti grad Zagreb. Rad na Studiji traje od 2013. godine i provodi se u okviru Razvojne strategije Grada Zagreba u skladu s važećim propisima, a u suradnji s Građevinskim fakultetom Sveučilišta u Zagrebu. Studija je prvotno zamišljena kao podrška opsežnijem projektu [83] unutar kojeg je planirano napraviti procjenu rizika za grad Zagreb (detaljnije u poglavlju 4.).

Iščekujući realizaciju projekta, tijekom šest godina rada na Studiji, u kojoj je sudjelovalo mnogo stručnjaka, obrađene su brojne teme vezane za aktivnosti prije i poslije potresa koje obuhvaćaju: oblikovanje kvalitetne baze podataka o građevinama (definiranje metodologije, obrazaca, ključnih atributa, podjela grada na karakteristične dijelove – izrada karte (slika 6.a), obuka popisivača itd.), razvoj metodologije brze inicijalne procjene potresne oštetljivosti (identifikacija ključnih parametara, oblikovanje obrasca, itd.), detaljne procjene potresne otpornosti građevina na temelju eksperimentalnih i numeričkih analiza uz identifikaciju kritičnih mjesta, prijedloge seizmičkih pojačanja, organizaciju pregleda oštećenih građevina nakon potresa (izrada obrazaca za preglede, organizacija sustava, edukacije, sudjelovanje na vježbama, itd.) i drugo (slika 14.). Sve navedene teme pridonose smanjenju rizika od potresa, a većina ih se može primijeniti i na druga područja u Hrvatskoj [84].

Od brojnih obrađenih tema, već su opisani napori na definiranju izloženosti (poglavlje 2.2), a bitno je istaknuti detaljne eksperimentalne i numeričke analize odabranih zgrada jer rezultati mogu biti višestruko iskoristivi. Prilikom odabira zgrada nastojalo se obuhvatiti karakteristične tipove zgrada prema razdobljima izgradnje, korištenim materijalima, visini građevine te primijenjenim propisima, zatim zgrade sa specifičnim lokalnim značajkama (primjerice, "limenke", zgrade izvedene tunelskom gradnjom i slično), tornjeve, važne zgrade (povijesne, vatrogasne postaje, bolnice, industrijske, studentski domovi, koncertne dvorane, kazališta, škole, druge javne zgrade, itd.) i ostale elemente kritične infrastrukture (slika 15.).

Za odabrane građevine najprije su provedena eksperimentalna istraživanja dinamičkih parametara primjenjujući suvremene metode [86], a zatim su izrađeni složeni numerički modeli. Treba istaknuti da se često vizualnim pregledom uočilo da stvarno stanje ne odgovara dostupnoj dokumentaciji, odnosno da je došlo do promjena tijekom izvedbe ili tijekom uporabe, a nisu evidentirane. S obzirom i na brojne ostale nepoznanice o konstrukcijskim sustavima, eksperimentalno određivanje dinamičkih parametara (slika 16.b) pokazalo se iznimno korisnim za kalibraciju numeričkog modela.

Slika 15. Izabrani primjeri zgrada detaljno analiziranih u Studiji



Slika 16. Pristup detaljnoj analizi postojeće građevine na temelju prikupljenih podataka: a) obrazac za inicijalnu procjenu potresne oštetljivosti; b) eksperimentalna istraživanja dinamičkih parametara; c) numerički model; d) obrazac sa sažetim prikazom rezultata analize [83]

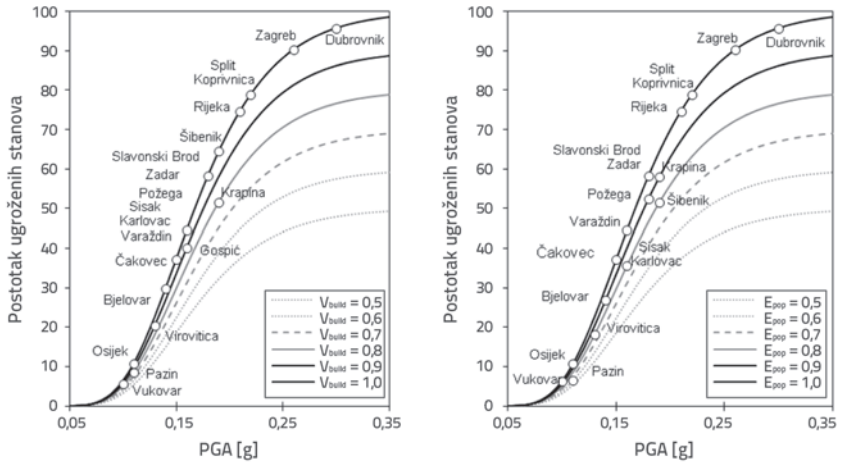
U konačnici je prema rezultatima numeričkih analiza (slika 16.c) napravljeno načelno vrednovanje, odnosno ocjena stanja i očekivanog ponašanja svih građevina pri djelovanju potresa, za djelovanje potresa povratnog razdoblja od 95 i 475 godina (prema EMS-98 ljestvici). Rezultati opisanih detaljnih analiza se mogu ekstrapolirati na veći broj građevina istog ili sličnog tipa te njihovim povezivanjem s gradskom četvrti i brojem stanovnika unutar takvih građevina mogu se dobiti korisni rezultati za preciznije procjene rizika. Dodatno, značajan doprinos u tome je što su za svaku analiziranu građevinu označena kritična mjesta, a to je posebice važno prilikom eventualnog raščišćavanja od djelomičnog urušavanja, spašavanja zatrpanih osoba ili pregleda nakon potresa manjeg intenziteta (u slučaju oštećenja može se na vrijeme reagirati, a posebice za slučaj ponavljanja potresa). Ti podaci se također mogu iskoristiti za prijedloge seizmičkih pojačanja, planove održavanja i ograničenje intervencija unutar zgrade čime bi se povećala sigurnost i produžio uporabni vijek građevine [84].

Među posebnim temama bilo je sistematizacija zagrebačkih savskih mostova koji su iznimno važni za funkcioniranje nakon potresa, a posebice za određivanje evakuacijskih putova (primjerice za neprekinutost prometnih tokova između Starog i Novog Zagreba) i detaljne analize bolnica Sveti Duh (slika 15.) te KBC-a Sestre milosrdnice i Fran Mihaljević. Zaključno, unutar Studije se provode brojne aktivnosti kojima se iz različitih aspekata pokušava obraditi problematika rizika od potresa.

3.6. Brza procjena seizmičkog rizika u Hrvatskoj (2016.)

Neizostavno treba istaknuti dugogodišnje istraživačke aktivnosti u području seizmičkog rizika na Sveučilištu u Osijeku, gdje se uspješno zadržala tradicija rada na procjenama rizika unatoč činjenici da svijest o riziku od potresa u Hrvatskoj već desetljećima opada. Neke od aktivnosti su već istaknute u poglavlju 2, a vezano za temu ovog rada istaknut će se brza procjena potresnog rizika urbanih područja u Hrvatskoj koja može biti prvi korak pri identifikaciji ugroženih područja. Primijenjen je simulacijski model koji unatoč manjkavostima statističkih podataka, obrađuje dostupne podatke u Hrvatskoj (primjerice podaci o stambenim jedinicama i gustoćama naseljenosti) i analizira ih u odnosu na vjerojatni potresni događaj (slike 17. i 18.). Dobiveni rezultati daju relativni odnos ugroženih područja, odnosno identificiraju područja u kojima se moraju potaknuti dodatne aktivnosti i izrada detaljnih procjena na mikrorazini urbanih ugroženih područja [87, 88].

Od ostalih aktivnosti u području može se istaknuti izrada baze podataka o građevinama za grad Osijek (četvrti najveći grad u Hrvatskoj s oko 110.000 stanovnika) pri čemu je zasad obrađeno više od 1500 zgrada [89]. Primjenjena je podjela na 15 tipova građevina pri čemu su obrađene škole, vrtići, zgrade iz predgrađa, stara jezgra grada [88] i slično, a za neke su izrađene i krivulje oštetljivosti [46].

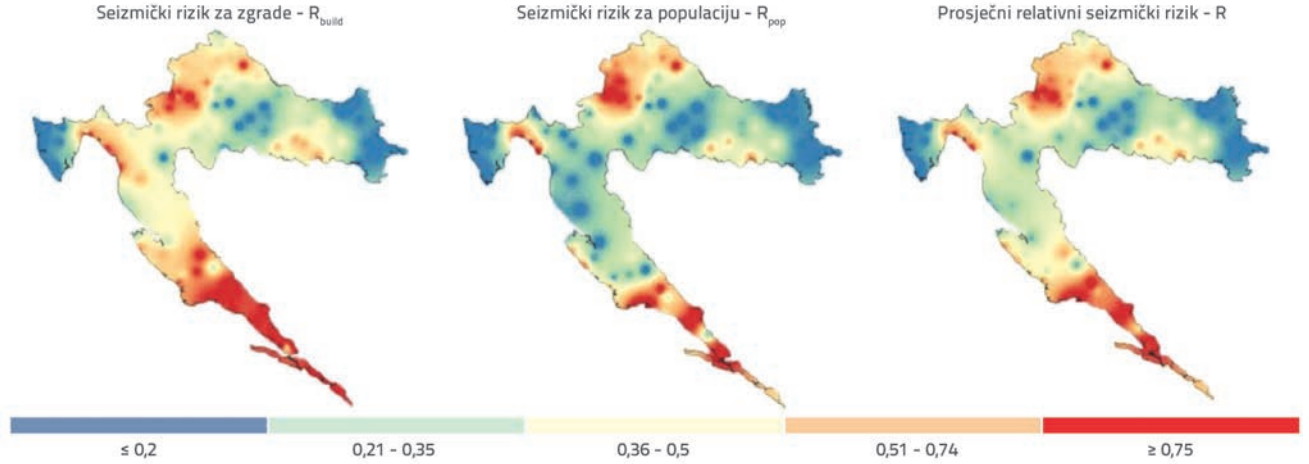


Slika 17. Modeli predviđanja potresnog rizika za Hrvatsku [87]

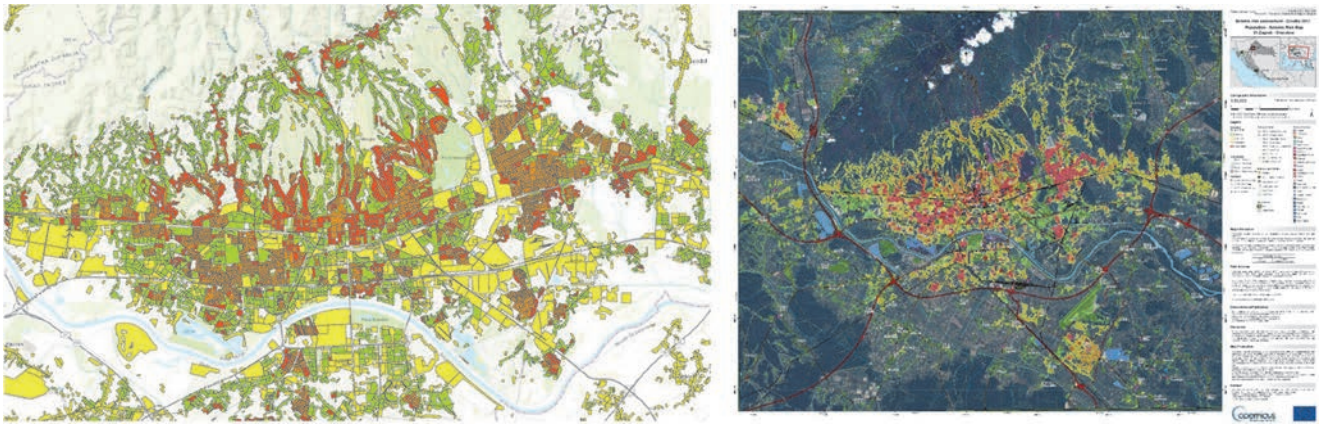
3.7. Procjena rizika u Hrvatskoj - EMSN-039 (2017.)

Procjena je napravljena za četiri grada u Republici Hrvatskoj (Zagreb, Split, Rijeka i Dubrovnik) aktivacijom Risk and Recovery Mapping komponente Coopernicus Emergency Management Service [29] na inicijativu Hrvatske udruge za krizni menadžment (HUKM). Procjenu je napravila tvrtka Indra Sistemas S.A iz Madrida. Javna objava rezultata (novine i portali) potaknula je stručnu raspravu pa je u konačnici, zbog uočenih velikih manjkavosti, procjena povučena sa službenih izvora. U kontekstu pregleda svih postojećih procjena, pozicioniranja i boljega razumijevanja problematike rizika od potresa, istaknut će se samo nekoliko činjenica. Osnovna ideja procjene je bila iskoristiti podatke koji se mogu dobiti satelitskim snimcima (uglavnom) uz podršku ostalih dostupnih servisa (primjerice OpenStreetMap). Hazard je definiran iz Karte potresnih područja (slika 4.b), a korišteni su

Također, može se istaknuti primjena različitih metoda procjene za analize potresne oštetljivosti poput makroseizmičke metode, a posebice treba istaknuti vlastitu predloženu metodu koja koristi indeks oštetljivosti čija je detaljna primjena opisana na primjeru grada Osijeka u radu [18]. Konačno, nužno je istaknuti i sveučilišni udžbenik vezan za procjenu ošteljivosti zgrada [91].



Slika 18. Procjena rizika za Hrvatsku pomoću relativne RAPID metode [88]



Slika 19. Podjela stanovništva na kategorije i karta seizmičkog rizika za stanovništvo [92]

i podaci iz popisa stanovništva iz 2011. godine. Za prikaz je korišten geostatski rasterski sloj s preciznošću od 100 m, pri čemu su kategorizirani dostupni podaci (primjerice građevine su kategorizirane po visini, tipu i materijalu), pridruženi su određeni težinski omjeri (ALARP načelo) i u konačnici se preklapanjem karata i korištenjem matrice rizika dobivaju rezultati razine oštetljivosti blokova. Dobiveni rezultati daju samo relativne odnose oštetljivosti što je vrlo gruba procjena (napomena iz zaključka dokumenta).

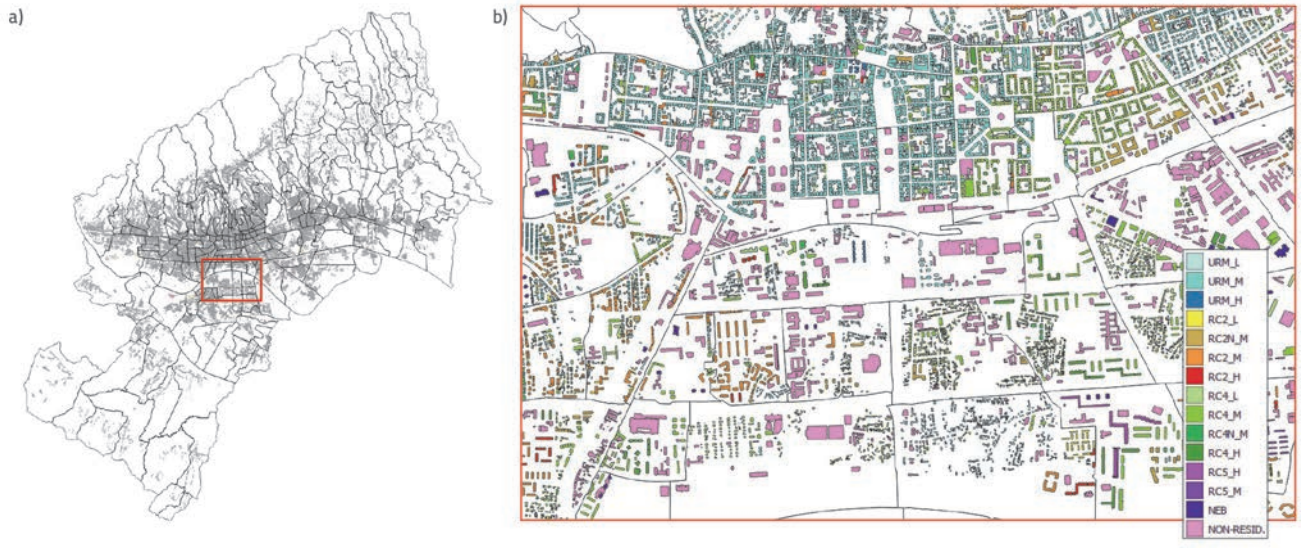
Prema dostupnim informacijama, autori planiraju korigirati uočene manjkavosti i dodatno prilagoditi rezultate potrebama planiranja i pripravnosti (primjerice evakuacijskim putovima), odnosno odmaknuti se od procjena rizika s obzirom na istaknute probleme (stručne kritike). Konačno, procjena je i danas prvi izbor u internetskim tražilicama za pojam rizika od potresa u Hrvatskoj, što pokazuje koliko je važno jasno pozicionirati postojeća istraživanja (rezultate) s ciljem osvješćivanja građana, ali i stručnjaka – jedan od osnovnih motiva ovog rada.

3.8. Ažurirana procjena rizika od katastrofa za Republiku Hrvatsku – Potres (2018.)

Ažurirana procjena rizika je najnovija procjena rizika za Hrvatsku, koja predstavlja značajan iskorak prema preciznijim procjenama, a napravljena je u skladu sa suvremenim istraživanjima (metodologijama). Zakon o sustavu civilne zaštite (NN 82/15 i 118/18) propisuje obvezu ažuriranja procjena svake tri godine, a po potrebi i češće. Procjena se naslanja na procjenu rizika iz 2015. godine (poglavlje 3.4), odnosno ažuriranom procjenom su se pokušale nadomjestiti prethodno uočene manjkavosti, posebice što se tiče izloženosti i oštetljivosti zgrada, s tim da pokušava obuhvatiti sve raspoložive podatke iz svih postojećih (prethodno opisanih) procjena rizika. Kao glavni izvršitelj procjenu je napravio Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu u suradnji s Prirodoslovno-matematičkim fakultetom Sveučilišta u Zagrebu na inicijativu Državne uprave za zaštitu i spašavanje i Ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja. Scenarij *Podrhtavanje tla u gradu Zagrebu uzrokovano potresom na razini povratnog razdoblja usklađenog s propisima za projektiranje potresne otpornosti,* koji je korišten 2015. godine, zadržan je s obzirom na iznimnu važnost grada Zagreba. Poboljšanja procjene seizmičkog rizika kroz svaki od faktora bit će ukratko opisana u daljnjem tekstu, a odmah se može istaknuti da je primijenjena detaljnija administrativna podjela na 218 mjesnih odbora (u poglavlju 3.4 je korištena podjela na 17 gradskih četvrti).

Seizmički hazard je definiran u skladu s Kartom potresnih područja u Republici Hrvatskoj (slika 4.b), pri čemu je za svaki mjesni odbor (njegovo težište) očitano vršno horizontalno ubrzanje za povratne periode od 475 i 95 godina. Utjecaj tla (amplifikacija) nije uzet u obzir jer je mikrozoniranje grada još u tijeku pa ne postoje ujednačeni podaci za sve mjesne odbore. Može se istaknuti da je naknadno analiziran i jedan deterministički scenarij koji predstavlja povijesni zagrebački potres, ali nije priložen u službenu procjenu.

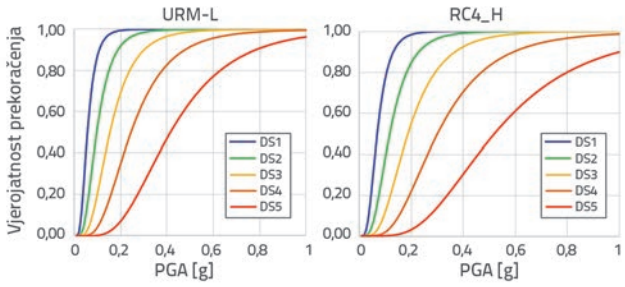
Izloženost fonda građevina osnovni je problem i prema njemu je napravljen najveći iskorak, odnosno prema identifikaciji podataka o konstrukcijskom sustavu građevina. Stoga su definirani najčešći tipovi konstrukcijskih sustava (njih 14) u gradu, a zatim je za svaki mjesni odbor određen udio svakog pojedinog tipa u ukupnom broju stambenih zgrada. Postupak je obuhvaćao odabir svake zgrade ili grupe zgrada i pridruživanje tipu nosivog sustava (dugotrajan posao). Također, na razini mjesnog odbora je svakom tipu konstrukcijskog sustava pridružen broj stanovnika kako bi se u konačnici mogao procijeniti broj mogućih žrtava s obzirom na procjenu očekivanog broja teško oštećenih i srušenih zgrada. Na slici 20. mogu se vidjeti podaci o konstrukcijskim sustavima zgrada za neke mjesne odbore, uneseni u GIS sustav, koristeći najnoviju



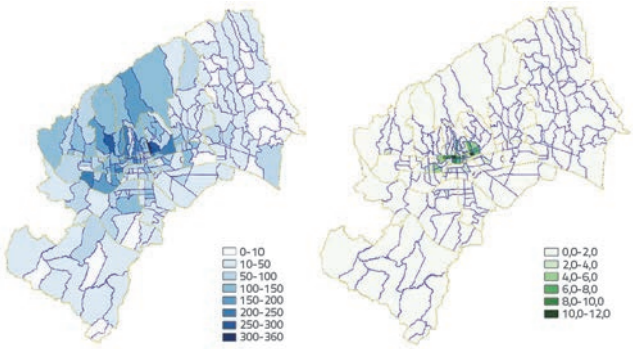
Slika 20. a) Karta Zagreba s granicama mjesnih odbora, b) Tipovi konstrukcija označeni na karti

ortofoto kartu grada iz 2018. godine kao podlogu. Primjerice, oznake tipova konstrukcijskih sustava URM odnose se na zidane zgrade bez serklaža, RC2 na zgrade s armiranobetonskim zidovima i slično, a u svim oznakama L, M i H se opisivala visina zgrade. Unatoč činjenici da se napravio velik pomak prema preciznijoj procjeni izloženosti građevina, nužno je istaknuti da realno postoji značajno više konstrukcijskih sustava pa je naknadno napravljena i kategorizacija sa 42 podtipa.

Analiza oštetljivosti izloženih građevina i troška provedena je na osnovi krivulja vjerojatnosti oštećenja (krivulje ranjivosti) i krivulja oštetljivosti (detaljnije opisane u 2.3). Za svaki definirani tip konstrukcije je pridružena krivulja, a postupak je proveden prema makroseizmičkoj metodi, u skladu s RISK-UE projektom [93]. Klasifikacija oštećenja provodi se prema EMS-98 ljestvici s pet stanja oštećenja, a oštetljivost zgrade se izražava indeksom oštetljivosti [94].



Slika 21. Primjeri krivulja vjerojatnosti oštećenja za tipove nosivih sustava URM_L i RC4_H



Slika 22. Troškovi u milijunima eura i troškovi u milijunima eura po hektaru

Očekivana oštećenja zgrada povezana su s relativnim financijskim gubicima zbog oštećenja u odnosu na vrijednost građevine, izražene omjerom troškova potrebnih popravaka i troškova zamjene zgrada. U postupku proračuna šteta korišteni su faktori štete (DF) u skladu s [95], a pridruživanjem faktora štete krivuljama vjerojatnosti oštećenja dobivene su funkcije oštetljivosti svakog konstrukcijskog tipa zgrada. Ukupni novčani gubitci uslijed zadanih scenarija djelovanja potresa izračunani su za svaki mjesni odbor po različitim konstrukcijskim sustavima zgrada. Procjena smrtno stradalih osoba je također napravljena za svaki mjesni odbor i određena je, ovisno o broju osoba, na osnovi procjene dobivene u srušenim zgradama tijekom djelovanja potresa. Pritom su se koristile preporuke iz literature [66, 67]. Može se istaknuti da je predviđeno rušenje gotovo 6.000 građevina (oko 5 %) i vrlo teško oštećenje 21.087 (oko 17 %). Izravna šteta je procijenjena na približno 15.590 milijuna eura, a za dobivanje cjelovitije slike može se istaknuti GIS prikaz (slika 22.) postotka srušenih zgrada u odnosu na ukupan broj zgrada u mjesnom odboru i broj srušenih zgrada po hektaru.

Općenito se može zaključiti da je prikazana metodologija velik iskorak u odnosu na sve postojeće procjene jer je napravljen pomak prema identifikaciji broja građevina i njihovom razvrstavanju prema konstrukcijskom sustavu, što je bio osnovni problem svih procjena rizika. Ipak, nužno je imati na umu da tek nakon kontinuiranih detaljnih istraživanja svakog od faktora seizmičkog rizika možemo govoriti o pouzdanim (preciznijim) procjenama.

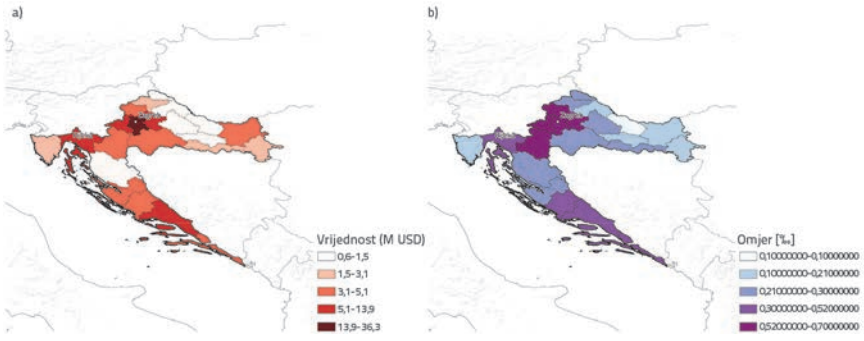
3.9. SERA projekt (Seismology and Earthquake Engineering Research Infrastructure Alliance for Europe), 2018.-2020.

Više puta spomenut je projekt SERA unutar kojeg je pokrenuto objedinjavanje i usklađivanje u jedinstveni model seizmičkog rizika za cijelu Europu [96]. Projekt je nastavak velikih europskih projekata, već spomenutih u poglavlju 2, poput projekta SHARE (analiziran seizmički hazard), projekta NERA (analizirana izloženost građevina) i projekta Syner-G (analizirane krivulje oštetljivosti). Fokus projekta je izloženost građevina na razini Europe, ali i dodatna analiza svake od komponenti rizika, vežući se za podatke iz postojećih projekata i novo prikupljene podatke. Partneri u projektu surađuju sa širom zajednicom kroz internetske aplikacije, radionice, sastanke, gdje kao stručnjaci za Hrvatsku sudjeluju i autori ovog rada. U konačnici će biti analizirani socioekonomski indikatori, prosječni godišnji gubitci, maksimalni gubitci i slično, a konačni cilj je jednolika procjena rizika za cijelu Europu i Europska karta rizika (očekuje se u travnju 2020.). Rezultati analiza bit će dostupni kroz GEM platformu [97] i na raspolaganju svima. Očekuje se daljnji kontinuirani razvoj modela kroz nove projekte, sve s ciljem razvoja strategija za umanjenje rizika.

Za Hrvatsku je napravljen pregled svih dostupnih baza podataka, a kako one ne zadovoljavaju, nadopunjavane su rezultatima upitnika gdje su eminentni stručnjaci u Hrvatskoj procjenjivali (prema iskustvu) potrebne parametre za analizu. Prikupljeni i analizirani podaci su: razdoblja primjene propisa za projektiranja (vezano za analizu duktilnosti zgrada), udio tipova građevina razvrstanih po GEM taksonomiji (primjerice armiranobetonske, zidane, omeđeno ziđe, čelične i slično), tipovi nosivog sustava s obzirom na opterećenje potresom (pretežno zidovi, okvirne konstrukcije, mješoviti sustavi itd.) i slično. Pritom su analizirane stambene građevine za gradska i ruralna područja te industrijske i komercijalne građevine. Na temelju prikupljenih podataka izračunana je novčana vrijednost fonda zgrada po pojedinim tipovima nosivih sustava, što je ulazni podatak za

daljnje procjene seizmičkog rizika. Primjerice, za grad Zagreb ukupna vrijednost stambenog fonda (engl. *replacement cost*) procijenjena je na 36 milijardi eura, a prema novoj GEM-ovoj karti rizika ističe se Zagreb kao područje najvećeg seizmičkog rizika s 35 M $ prosječnih godišnjih gubitaka. Prosječni godišnji gubici izračunani su kao omjer ukupnih financijskih gubitaka za određeni povratni period i povratnog perioda izraženog u godinama (u prikazanom slučaju je povratni period 200 godina, što znači pretpostavku da će ti gubici biti ostvareni ili premašeni barem jednom svakih 200 godina). Pretpostavlja se da gubici nastaju uslijed direktnih šteta na stambenim, poslovnim i industrijskim zgradama koje nastaju zbog gibanja tla tijekom potresa. Relativni prosječni godišnji gubici dobiveni su kao omjer prosječnih godišnjih gubitaka i ukupnog troška zamjene fonda zgrada.

Općenito se može zaključiti da opisani pristup izravno ovisi o pouzdanosti ulaznih (prikupljenih) podataka, ali iznimno je korisno što će se iskoristiti suvremene metode za procjene rizika koje se uvijek kontinuirano razvijaju, a podaci nadopunjuju. Prikupljeni podaci se upravo analiziraju, a konačni rezultat bit će vrlo koristan kao reprezentativna analiza prema trenutačno dostupnim podacima, ali i za usporedbe s ostalim članicama EU.



Slika 23. a) Predviđeni prosječni godišnji gubici; b) Relativni prosječni godišnji gubici uzrokovani potresima u Hrvatskoj [97]

4. Pogled u budućnost

Unatoč brojnim problemima (izazovima) i razlikama u rezultatima postojećih procjena rizika, svi rezultati nedvojbeno ističu da razorni potres u Hrvatskoj može imati katastrofalne posljedice i da predstavlja neprihvatljiv rizik. Budući da potrese nije moguće spriječiti, provođenje mjera za ublažavanje posljedica potresa i pripremljenost društvene zajednice od iznimne su važnosti. Mjere za ublažavanje posljedica najlakše je usmjeriti prema novim propisima koji bi trebali osigurati potresno otporne građevine, ali s obzirom na to da se u Hrvatskoj ne očekuje velika izgradnja novog stambenog fonda, ključno je kvalitetno analizirati postojeće građevine. Primjerice, pouzdanim procjenama rizika i razradom scenarija mogu se dobiti podaci za strateško djelovanje prema seizmičkim pojačanjima određenih tipologija građevina ili pripremljenosti interventnih službi. Sve upućuje na to da je nužno kontinuirano i odgovorno raditi na problematici rizika od potresa, a neki od ključnih koraka su već istaknuti u poglavlju 2 kroz analize svakog faktora seizmičkog rizika.

Dodatni poticaj može biti Sendai okvir za smanjenje rizika od katastrofa 2015.-2030. (UN-ov dokument donesen 2015. godine) koji ističe sedam ciljeva i četiri prioriteta za djelovanje kako bi se spriječili novi i smanjili postojeći rizici od katastrofa, a među osnovnim ciljevima je smanjenje ljudskih žrtava, izravnih ekonomskih gubitaka te šteta na kritičnoj infrastrukturi uslijed prirodnih katastrofa. Potiče se i djelovanje znanstvenoistraživačke zajednice usmjereno na faktore i scenarije rizika od katastrofa, a posebice za regionalne, nacionalne i lokalne primjene [98]. Nadalje, ističe se činjenica da je otpornost na katastrofe među glavnim aspektima održivog razvoja; u vezi s tim poziva institucije Europske unije da osiguraju kako bi to načelo dobilo središnje mjesto u budućim mjerama održivog razvoja u Europi i kako bi se uzelo u obzir u budućim europskim fondovima i projektima. Zaključci Sendai okvira su pisani općenito, ali zahvaćaju gotovo sve prethodno istaknute probleme prisutne u Hrvatskoj, pa samo ostaje pitanje naše prilagodbe.

Jedan od važnih projekata koji bi obuhvatio većinu istaknutih problema predložili je su Ured za upravljanje u hitnim situacijama Grada Zagreba i Akademija tehničkih znanosti Hrvatske (Aničić i sur.), a odnosi se na detaljnu analizu potresnog rizika grada Zagreba [83]. Projekt je predložen još 2014. godine, a u nekoliko izmjena je prilagođen da bude pilot-projekt za cijelu Hrvatsku, pri čemu bi se definirala metodologija za pouzdanije procjene rizika zgrada, inženjerskih građevina i stanovništva. Može se istaknuti da su projektom predviđena dodatna istraživanja za određivanje potresne opasnosti (uključujući postojeća istraživanja mikrozoniranja). Osim toga, predviđena je detaljna baza podataka o građevinama (za zgradu po zgradu) s obzirom na osnovne značajke (funkciju, nastanjenost, ulogu nakon potresa i slično) te procjena oštetljivosti (prema dostupnim podacima), a u konačnici i da se utvrdi rizik za stanovnike i imovinu. Unutar prijedloga projekta napravljena je i preliminarna procjena rizika od potresa kojemu mogu biti izloženi stanovnici i infrastrukturne i druge građevine u slučaju jakog potresa u Zagrebu, čiji su dijelovi iskorišteni za procjenu ugroženosti grada Zagreba iz 2016. i 2018. godine. Glavni je cilj projekta doći do novih spoznaja koje će poslužiti službama Grada Zagreba da odluče o mjerama koje treba poduzeti kako bi se ljudske žrtve i gospodarski gubici nakon velike prirodne katastrofe sveli na najmanju moguću mjeru. Projektom se planiralo povezati nove znanstvene i stručne spoznaje s organizacijama i službama Grada Zagreba, uključujući preporuke od UN *Office for Disaster Risk Reduction*, široko zahvaćajući aktivnosti društva. Dodatna vrijednost projekta je što daje detaljan pregled povijesti, pri čemu su istaknute

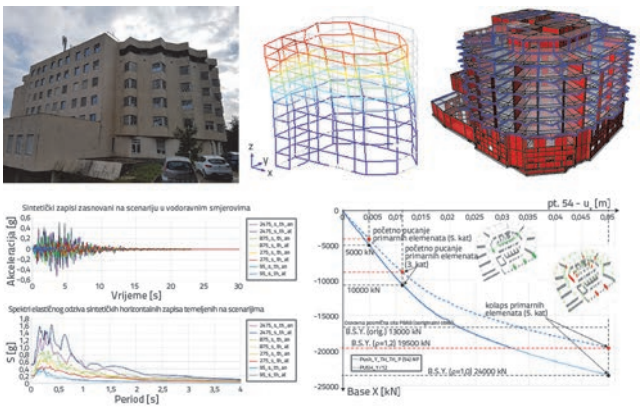
promjene u društvu koje su uzrokovali razorni potresi, dan je osvrt na promjene propisa, na razvoj istraživanja u svijetu, na procjene rizika i njihov razvoj, a posebice na reprezentativnu stručnu i znanstvenu literaturu što može poslužiti svima koji se bave rizicima od potresa. Očekuje se da rezultati projekta budu prekretnica za analize rizika u Hrvatskoj i da tek nakon realizacije jednog takvog projekta, koji će omogućiti detaljnije podatke o konstrukciji, možemo govoriti o pouzdanijim procjenama rizika od potresa. Ipak, treba biti svjestan da ni taj projekt neće odmah riješiti brojne probleme u Hrvatskoj, ali može poslužiti kao velik iskorak u pogledu osvješćivanja građana i odgovornih institucija prema značajnijem djelovanju.

Realizacija jednog takvog projekta se najbolje može oplemeniti kroz platformu poput Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa koja na državnoj razini izvrsno povezuje stručnjake koji se bave rizikom od potresa s nadležnim državnim tijelima. Takve inicijative su rezultirale doprinosima znanstvenih istraživanja na procjenama rizika (poglavlja 3.4 i 3.8) i realizacijom nekoliko projekata čiji se rezultati implementiraju u hrvatski sustav. Primjerice, projekt Matilda (MultinATIonal moduLe on Damage Assessment and countermeasures) dio je jednog većeg programa koja financira Europska komisija (*Civil Protection Preparatory Action on an EU Rapid Response Capability*), a realiziran je od 2014. do 2016. Osnovna ideja je bila razviti sposobnosti za internacionalne hitne slučajeve koji se po potrebi aktiviraju u okviru mehanizma Unije za civilnu zaštitu i ostvariti što bolju koordinaciju civilne zaštite u slučaju katastrofe. Bitan element projekta je bio uključivanje građevinskih stručnjaka u procese procjena oštećenja zgrada nakon potresa i suradnju s interventnim postrojbama. Povezivanjem znanstvenika s Građevinskog fakulteta u Zagrebu, stručnjaka iz prakse i interventnih postrojbi ostvarena je suradnja koja povezuje različita znanja i iskustva s ciljem optimalne reakcije nakon razornih potresa. Rezultati i iskustva iz projekta se postupno implementiraju u hrvatske sustave kroz vježbe (Istra 2017, ZG POTRES 2018, Cascade'19), radionice te implementaciju građevinskih stručnjaka u MUSAR timove i slično [99].

Također, ravnateljstvo civilne zaštite Ministarstva unutarnjih poslova provodi projekt *Na putu do smanjenja rizika od katastrofa* s ciljem edukacije djece školske dobi i podizanje svijesti građana o prijetnjama u Republici Hrvatskoj. Jedan od elemenata projekta je i nabava potresnog simulatora kako bi djeca i građani mogli osjetiti snagu potresa te pokušati izgraditi model građevine otporne na potres. Ovakve aktivnosti su izrazito važne jer je osvješćivanje građana ključan korak prema cjelovitom rješavanju problematike rizika od potresa.

Nadalje, početkom 2019. godine je započeo projekt "Sprječavanje, upravljanje i prevladavanje rizika od prirodnih katastrofa radi ublažavanja njihova utjecaja na gospodarstvo i društvo" (PMO-GATE) u okviru programa Interreg Italy–Croatia 2014.-2020. na kojem sudjeluje Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu (Nikolić i sur.). Sveukupni ciljevi ovog projekta su zajednički razvoj inovativne metodologije za sprječavanje, upravljanje i prevladavanje opasnosti od prirodnih katastrofa u uključenim regijama Italije i Hrvatske i podizanje razine zaštite i otpornosti na prirodne katastrofe specifične za područje uključenih regija, poput riječnih i morskih poplava, meteoroloških tsunamija i potresa. Predloženi pristup temelji se na integraciji procjene rizika, sprječavanja, pripravnosti i akcija odziva na navedene prirodne katastrofe. Taj pristup objedinjuje tri glavna čimbenika: kapitalizaciju postojećeg znanja uključenih regija u području upravljanja prirodnim katastrofama, definiranje mogućih scenarija uključujući detaljnu analizu teritorijalnih ugroženosti u skladu sa zakonodavstvom zajednice koja upravlja strateškom procjenom utjecaja na okoliš i učinkovite komunikacijske strategije koje podižu svijest i mijenjaju percepciju stanovništva i javnih agencija putem dvosmjerne komunikacije između uključenih regija i pogođenih članova zajednice.

U tijeku je i realizacija projekta "Resilience Enhancement of ADriatic basiN from firE and SeiSmic hazards – READINESS" unutar kojeg se analiziraju građevine od posebne (strateške) važnosti poput škola i bolnica u tri županije [100]. U realizaciji projekta sudjeluju Prirodoslovno-matematički fakultet i Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, a posebice treba istaknuti izrazito složenu i detaljnu analizu Opće bolnice u Dubrovniku koja uključuje *state-of-the-art* ispitivanja dinamičkih parametara i numeričke proračune na više razina (uključujući nelinearnu statičku metodu postupnog guranja i nelinearnu dinamičku analizu po vremenskim koracima). Takvi projekti, odnosno investicije u analize potresne otpornosti važni su jer su zgrade kritične infrastrukture uglavnom starije od 50 godina, što je uobičajeno vremensko razdoblje na koje se zgrade projektiraju. Građevine kritične infrastrukture važne su da funkcioniraju nakon djelovanja potresa, pa stoga moraju biti prioritetne i za seizmička pojačanja [101].



Slika 24. Detaljna analiza Opće bolnice u Dubrovniku: a) fotografija analizirane građevine, b) rezultati eksperimentalnih mjerenja ambijentalnih vibracija, c) numerički model, d) zapisi ubrzanja u vremenu, e) krivulja kapaciteta nosivosti zgrade [101]

Nažalost ima i propusta, primjerice nepovezivanje seizmičkih pojačanja s aktualnim aktivnostima vezanim s energetskom obnovom i certificiranjem zgrada (za koje je postojalo

financiranje). Može se zaključiti da je, osim nedostatka financijskih sredstava, glavni problem i nedovoljno razvijena svijest o riziku od potresa jer se unutar energetske obnove propustilo prikupiti podatke o konstrukcijskim svojstvima za popunjavanje baza podataka o svojstvima građevina. Nova prilika se pokazuje jer je 2018. godine Vijeće EU revidiralo Direktivu vezanu za energetsku obnovu (Directive 2018/844) i istaknulo nužnost i seizmičke obnove zgrada u seizmički ugroženim područjima. Unutar Direktive istaknute su zgrade koje prolaze značajnu rekonstrukciju, a Hrvatska je mora implementirati do ožujka 2020. Na navedene aktivnosti se izravno naslanjaju i problemi sustava ulaganja u održavanje građevina, što je posebna tema.

Nove prilike koje se ne bi smjele propustiti odnose se na moderne tehnologije koje mogu omogućiti važne podatke, nužne za procjenu rizika. Primjerice, precizne snimke građevina visokom rezolucijom koristeći satelite, LIDAR, dronove (bespilotne letjelice), *Google Street View* i slično mogu se dobiti podaci o tlocrtnim dimenzijama, visini, katnosti i slično. Važno je istaknuti da isključivo takvi podaci nisu dovoljni, odnosno da ih trebaju obraditi stručnjaci (problemi opisani u 3.7), ali i nadopuniti ostalim podacima bitnim za procjene oštetljivosti (primjerice konstrukcijskom sustavu, funkciji, načinu korištenja i slično).

Mnoge zemlje u seizmički aktivnim područjima imaju slične probleme s procjenama rizika kao i Hrvatska. Stoga je bitno imati na umu opsežne istraživačke napore na globalnoj razini koji su posvećeni razvitku metodologija ocjenjivanja seizmičkog rizika (uključujući moderne tehnologije), a mogu se iskoristiti i za procjene rizika u Hrvatskoj. Već je kao primjer istaknuta inicijativa Global Earthquake Model (GEM) koja radi na izradi najnaprednijih baza podataka širokih mogućnosti primjene uključujući programske pakete/alate za procjenu seizmičkog rizika. Ugrađene baze podataka i modeli trebali bi se kontinuirano razvijati na osnovi razmjene iskustava i suradnje korisnika, što uključuje i stručnjake iz Hrvatske.

Sve prethodno navedeno kao da žudi za sustavnim i cjelovitim povezivanjem kroz specijaliziranu platformu koju imaju gotovo sve države izložene velikom riziku od potresa, i to mora biti u strateškim prioritetima Hrvatske. Takva platforma na vrijeme bi prepoznala i prethodno istaknute izazove/probleme (poglavlje 2.) vezane za faktore seizmičkog rizika koji će se još jednom sažeto istaknuti. Za bolje definiranje seizmičkog hazarda nužno je predvidjeti seizmološka, geološka, geotehnička i seizmotektonska istraživanja, povećati gustoću mreže seizmografskih i akcelerografskih postaja, definirati detaljnu kartu rasjeda, provesti mikrozoniranje, kontinuirano revidirati karte potresne opasnosti i slično. Za bolje definiranje izloženosti važno je predvidjeti opsežnu (''ultimativnu'') bazu podataka o građevinama koja bi povezivala sve dostupne baze podataka, statističke podatke, podatke iz arhiva, iz projekata (znanstvenih i stručnih), odnosno sve dostupne atribute (opisani u 2.2) koji mogu pomoći za procjene seizmičkog rizika, ali i ostalih rizika (neke baze ih imaju oko 100). Takva baza je vrijedna jer se može iskoristiti i za prikupljanje brojnih ostalih podataka koji se mogu povezati s raznim potrebama (primjerice interventnih službi u situacijama nakon djelovanja razornih potresa). Bolje definiranje oštetljivosti se izravno nadovezuje na podatke o hazardu i izloženosti, a baza podataka o osjetljivosti mora povezivati sva dostupna istraživanja (u Hrvatskoj i svijetu), dodatno predvidjeti istraživanja lokalno specifičnih zgrada, kritične infrastrukture (bolnice, škole, mostovi) i svih ostalih parametara potrebnih za preciznije procjene. Sve baze je nužno kontinuirano razvijati i nadopunjavati te prilagođavati ih različitim potrebama, primjerice [102]. Prema tome, jasno se ističe nužnost povezivanja stručnjaka (objedinjavanje znanja) i institucija (od državnih do lokalne samouprave) kroz platformu (centar s legimitetom poput IZIIS-a) gdje bi se svi prikupljeni podaci analizirali, usklađivali prema suvremenim znanstvenim dostignućima, iskorištavali za različite potrebe (osvješćivanje građenja, izradu različitih uputa, osiguranje građevina, predlaganje seizmičkih ojačanja i slično) što će u konačnici, korak po korak, dovesti do umanjenja posljedica djelovanja potresa.

5. Zaključak

Republika Hrvatska je jedna od seizmički ugroženijih država u Europi, a zasada su aktivnosti vezane za rizik od potresa minimalne i nepovezane. Primjerice, sada u Hrvatskoj postoje brojne procjene rizika, različitih autora i metodologija, te nekoliko pojedinačnih nepovezanih inicijativa što otežava aktivnosti prema umanjenju posljedica, a za javnost može biti vrlo zbunjujuće. Stoga je iz pozicije glavnog izvršitelja za rizik od potresa u Hrvatskoj napravljena analiza svih postojećih procjena rizika za Hrvatsku (poglavlje 3) s ciljem pregleda i boljega razumijevanja cjelokupne situacije vezane za procjene rizika u Hrvatskoj i u svijetu. Za svaku od procjena je izdvojena metodologija i najvažniji rezultati, ali i osvrt na doprinose i manjkavosti s ciljem međusobnog pozicioniranja i povezivanja. Očit je kontinuirani napredak i priključak suvremenim istraživanjima, što se posebice odnosi za zadnje procjene (primjerice poglavlje 3.8), ali ističu se i brojni problemi koji onemogućuju veću preciznost procjena. Problemi su istaknuti i kroz opis uobičajene metodologije za procjene rizika od potresa (poglavlje 2), pri čemu je pojedinačno analiziran svaki od faktora (elemenata) kroz pregled sadašnjega stanja u istraživanju u Hrvatskoj i svijetu. Kao glavna prepreka za pouzdane procjene rizika od potresa u Hrvatskoj istaknute su manjkave baze podataka o građevinama, a dodatno otežavaju karakteristični problemi poput masovne nezakonite gradnje, brojne nedokumentirane rekonstrukcije, lokalno specifične građevine, starost stambenog fonda i građevina kritične infrastrukture, slaba organizacija cijelog sustava, manjak financijskih sredstava i drugo.

Unatoč manjkavostima i razlikama u rezultatima, sve postojeće procjene jasno ističu potres kao jedan od najvećih rizika za Republiku Hrvatsku s mogućim katastrofalnim posljedicama. Istaknuto je da bi razarajući potres (koji bi uništio dio stambenog fonda i/ili radna mjesta) mogao narušiti krhku ekonomsku stabilnost države (gospodarstvo), dodatno povećati trenutačno

aktualno iseljavanje stanovništva i u konačnici ugroziti društvenu i političku stabilnost države [19]. Za države u kojima moguće posljedice uvelike premašuju financijske kapacitete, procjene rizika od potresa moraju biti od naročitog interesa za državne vlasti jer su osnova za provođenje politika (procjene sposobnosti, kapaciteta, provođenje strategija, i slično).

Ponuđena je vizija budućnosti (poglavlje 4.) gdje bi se rizik od potresa razmatrao na sustavan i cjelovit način, oslanjajući se na suvremena znanstvena dostignuća povezana jedinstvenom platfomom. Objedinjavanjem znanja te centraliziranim povezivanjem stručnjaka i institucija uspostavilo bi se tijelo koje će se kontinuirano baviti rizikom od potresa, rješavanjem istaknutih problema i sustavno raditi na smanjenju posljedica. Takvim bi se pristupom izbjeglo propustiti prilike za djelovanje poput iskorištavanja pozitivnih aktivnosti vezanih za energetsku obnovu ili uključivanje podataka o konstrukcijskim svojstvima prilikom oblikovanja raznih baza podataka (primjerice popis stanovništva, registar zgrada i slično).

Zaključno, svijest o riziku od potresa u Hrvatskoj zasad nije razvijena, sustav je relativno zanemaren, odnosno čini se da nas je uljuljala mala vjerojatnost pojave (u odnosu na ostale rizike) potresa i da još uvijek ignoriramo činjenicu da se potres u Hrvatskoj ubraja u neprihvatljive rizike. Nužno je djelovati jer, za razliku od nekih drugih država koje su bile izlozene razornim potresima, još uvijek imamo vremena reagirati prije eventualne katastrofe.

Zahvala

Ovako opširnu temu ne bi bilo moguće obraditi bez velike prodrške brojnih kolega i prijatelja. Ponajprije upućujemo veliku zahvalu kolegama s Katedre za statiku, dinamiku i stabilnost konstrukcija koji su započeli istraživanja na temu rizika od potresa, što se posebno odnosi na Damira Lazarevića i Sanju Hak, koja je trenutačno zaposlena u tvrtki *Basler & Hofmann*. Neophodno je istaknuti i ostale kolege sa Zavoda za tehničku mehaniku, i to Domagoja Damjanovića, Joška Krolu, Ivana Duvnjaka, Marka Bartolca, Janka Košćaka i druge, koji su posebice doprinijeli eksperimentalnome dijelu istraživanja (poglavlje 3.5.).

Iznimno korisne suradnje ostvarene su i s ostalim zavodima na Fakultetu, a treba istaknuti kolegu Zvonka Sigmunda sa Zavoda za organizaciju građenja, podršku Zavoda za geotehniku i uprave fakulteta. Veliko hvala upućujemo kolegama Luki Korlaetu i Nini Viragu s Arhitektonskog fakulteta (definiranje izloženosti; poglavlje 2.2.) s kojima je počela suradnja s drugim fakultetima, a neophodnu dimenziju i podršku (definiranje hazarda) dali su i kolege s Geofizičkog odsjeka pri Prirodoslovno-matematičkome fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, osobito Snježan Prevolnik (poglavlje 2.1.), Marijan Herak i Ivo Allegretti.

Na pregledu postojećih istraživanja (poglavlja 2., 3.1. i 3.2.), prijenosu znanja, brojnim korisnim savjetima i usmjerenjima za budućnost (poglavlje 4.) zahvaljujemo umirovljenome profesoru Draženu Aničiću. Iznimno korisne savjete, koji graniče s mentorstvom prema suvremenim procjenama rizika (poglavlja 2. i 3.8.) dao nam je Miroslav Nastev, istraživač s *Geological Survey of Canada* (*Natural Resources Canada*), a znanstvenu cjelinu zaokružili su Vitor Silva (*Global Earthquake Model* – GEM), Helen Crowley (EUCENTRE; poglavlje 3.9.), Marijana Hadzima-Nyarko (Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek; poglavlje 3.6.), Željana Nikolić (Sveučiliste u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije; poglavlje 4.), Nenad Bijelić (*Universität Innsbruck*) i mnogi drugi.

Na ključnome prepoznavanju problematike i financijskoj podršci u neophodnim istraživanjima (poglavlje 3.5.) zahvaljujemo Uredu za upravljanje u hitnim situacijama Grada Zagreba, osobito Pavlu Kaliniću, Daliboru Belegiću, Kristini Martinović i Željku Basti. Presudna je bila i suradnja s Ministarstvom unutarnjih poslova RH, Ravnateljstvom civilne zaštite, osobito Zavišom Šimac (poglavlja 1., 3.4. i 4.), Natašom Holcinger i Igorom Milićem, te Ministarstvom graditeljstva i prostornoga uređenja, odnosno Davorinom Oršanićem i Damirom Borovićem, jer jedino zajedničko djelovanje može znatnije pokrenuti stvari kada je riječ o problematici tako važnoj za Hrvatsku.

LITERATURA

[1] Atalić, J., Hak, S.: Procjena rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj – rizik od potresa, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet u suradnji s Ministarstvom graditeljstva i prostornog uređenja i Državnom upravom za zaštitu i spašavanje, Hrvatska, 2014.

[2] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M.: Ažurirana procjena rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj – rizik od potresa, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet u suradnji s Ministarstvom graditeljstva i prostornog uređenja i Državnom upravom za zaštitu i spašavanje, Hrvatska, 2018.

[3] Zaključci sa 7. konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa, http://www.platforma.hr/images/dokumenti/Zakljucci %207. %20konferencija_potpisano.pdf, 09. 11. 2018.

[4] Ivančić, I.: Croatian Earthquake Catalogue – Presentation, Hrvatska seizmološka služba, Geofizički odsjek, Prirodoslovno-matemički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, The Nato Science for Peace and Security Programme Workshop, (http://www.wbalkanseismicmaps.org/), 2011.

[5] Ivančić, I., Herak, D., Herak, M., Allegretti, I., Fiket, T., Kuk, K., Markušić, S., Prevolnik, S., Sović, I., Dasović, I., Stipčević, J.: Seismicity of Croatia in the period 2006–2015, GEOFIZIKA, 35 (2018) 1, pp. 69-98, https://doi.org/10.15233/gfz.2018.35.2

[6] Markušić, S., Herak, D., Ivančić, I., Sović, I., Herak, M., Prelogović, E.: Seismicity in Croatia in the period 1993-1996 and the 1996 Ston Slano Earthquake of 1996, GEOFIZIKA, 15 (1998), pp. 83-102.

[7] Stojan, A., Crnogorac, M., Stiplašek, B., Čoro, D.: Structural repair of earthquake-damaged buildings in Ston and Dubrovnik littoral (in Croatian), Graditelji u razvitku Republike Hrvatske, HSGI, Cavtat, pp. 105-117, 2000.

[8] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M., Hak, S.: Problemi pri procjenama seizmičkog rizika u Hrvatskoj, Zbornik VII. Konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa, (ur. Holcinger, N.), Zagreb, pp. 108-116, 2018.

[9] Simović, V.: Potresi na zagrebačkom području, GRAĐEVINAR, 52 (2000) 11, pp. 637-645.

[10] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M. Hak, S.: Izazovi u procjeni seizmičkog rizika u Hrvatskoj, Sixth International Conference Seismic Engineering and Engineering Seismology, Kraljevo, pp. 65-80, 2018.

[11] D'Ayala D.F., Paganoni, S.: Assessment and analysis of damage in L'Aquila historic city centre after 6th April 2009, Bulletin of Earthquake Engineering, 9 (2011) 1, pp. 81-104, https://doi.org/10.1007/s10518-010-9224-4

[12] Maugeri, M., Massimino, M.R., Grasso, S.: The 2012 Emilia-Romagna Earthquake (Italy): Lessons and Mitigation Measurements, The 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2012.

[13] Rossi, A., Tertulliani, A., Azzaro, R. et al.: The 2016–2017 earthquake sequence in Central Italy: macroseismic survey and damage scenario through the EMS-98 intensity assessment, Bulletin of Earthquake Engineering, 17 (2019) 5, pp. 2407–2431, https://doi.org/ 10.1007/s10518-019-00556-w

[14] Silva, V.: Development of open-source tools for seismic risk assessment: application to Portugal, PhD Thesis, University of Aveiro, Portugal, 2013.

[15] Wallemacq, P., House, R.: Economic Losses, Poverty and Disasters 1998-2017, United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2018.

[16] Cummins, J.D., Mahul, O.: Catastrophe Risk Financing In Developing Countries: Principles For Public Intervention, The World Bank, Washington DC, USA, 2009.

[17] Aničić, D., Berz, G., Boore, D., Bouwkamp, J., Hakenbeck, U., McGuire, R., Sims, J., Wieczorek, G.: Reconnaissance Report: Montenegro, Yugoslavia Earthquake, April 15, 1979, eds. Leeds, A., Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, 1980.

[18] Hadzima-Nyarko, M., Kalman Šipoš, T.: Insights from existing earthquake loss assessment research in Croatia, Earthquakes and Structures, 13 (2017) 4, pp. 401-411, https://doi.org/ 10.12989/eas.2018.13.4.365

[19] Calvi, G.M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J.J, Restrepo-Vélez, L.F., Crowley, H.: Development of Seismic Vulnerability Assessment Methodologies Over the Past 30 Years, ISET Journal of Earthquake Technology, 43 (2006) 3, pp. 75-104, https://doi.org/ 10.1007/s11069-011-0082-4

[20] Bal, I.E., Crowley, H., Pinho, R.: Displacement-Based Earthquake Loss Assessment: Method Development and Application to Turkish Building Stock, Research Report Rose 2010/02, IUSS Press, Pavia, 2010.

[21] Crowley, H., Bommer, J.J.: Modelling Seismic Hazard in Earthquake Loss Models with Spatially Distributed Exposure, Bulletin of Earthquake Engineering, 4 (2006) 3, pp. 249-273, https://doi.org/10.1007/s10518-006-9009-y

[22] Markušić, S.: Seismicity of Croatia (chapter), Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries, eds. E.S. Husbye, Springer, pp. 81-98, 2008, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6815-7

[23] Woessner, J. i sur.: The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results, Bull Earthquake Eng, 13 (2015), pp. 3553–3596, https://doi.org/ 0.1007/s10518-015-9795-1

[24] Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović I.: Republic of Croatia, Seismic hazard map, 2011. http://seizkarta.gfz.hr

[25] Federal Emergency Management Agency (FEMA): Methodology for Estimating Potential Losses from Disasters (HAZUS), (https://www.fema.gov/hazus).

[26] Akkar, S., Boomer, J.J.: Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East, Seismological Research Letters, 81 (2010) 2, pp. 195-206, https://doi.org/ 10.1785/gssrl.81.2.195

[27] Herak, M. i sur.: Seizmičko i geološko mikrozoniranje prema standardima Eurokoda 8 za zapadni dio podsljemenske urbanizirane zone, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek, 2013.

[28] Herak, M., Herak, D., Markušić, S.: Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908-1992, Terra Nova, 8 (1996), pp. 86-94, https://doi.org/ 10.1111/j.1365-3121.1996.tb00728.x

[29] Spence, R., Foulser-Piggott, R., Pomonis, A., Crowley, H., Masi, A., Chiauzzi, L., Zuccaro, G., Cacace, F., Zulfikar, C., Markus, M., Schaefer, D., Sousa, M.L., Kappos, A.: The European Building Stock Inventory: Creating and Validating a Uniform Database for Earthquake Risk Modelling, Proceedings of the 15th World Conference of Earthquake Engineering, Lisbon, 2012.

[30] FEMA 2006 (Federal Emergency Management Agency): HAZUS-MH MR2 Tech.Manual, Washington, 2006

[31] Abo-El-Ezz, A., Smirnoff, A., Nastev, M., Nollet, M.J., McGrath, H.: ER2-Earthquake: Interactive web-application for urban seismic risk assessment, International Journal of Disaster Risk Reduction, 34 (2019), pp. 326-336.

[32] Lang, D.H., Jaiswal, K.: Global Database on Seismic Vulnerability Information: Building on the WHE-PAGER Network, Project Proposal Presented to Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR), Washington, 2011.

[33] Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., Masure, P.: The European RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 2004.

[34] Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A.W., Allen, I., Greene, M., Jaiswal, K., Silva, V.: GEM Building Taxonomy Version 2.0, GEM technical report 2013-02 V1.0, GEM Foundation, Pavia, 2013.

[35] Crowley, H., Ozcebe, S., Baker, H., Foulser-Piggott, R., Spence, R.: D7.2 State of the Knowledge of Building Inventory Data in Europe, NERA - Seventh Framework Programme EC project number: 262330 www.nera-eu.org , 2014.

[36] Gamba, P., Cavalca, D. Jaiswal, K., Huyck, C., Crowley, H.: The GED4GEM Project: Development Of a Global Exposure Database for the Global Earthquake Model Initiative, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, 2012.

[37] Gamba, P.: Global Exposure Database: Scientific Features, GEM Technical Report 2014-10V1.0.0, pp. 46., GEM Foundation, Pavia, Italy, 2014, https://doi.org/ 10.13117/GEM.EXP--MOD.TR2014.10

[38] Atalić, J., Krolo, J., Damjanović, D., Uroš, M., Sigmund, Z., Šavor Novak, M., Hak, S., Korlaet, L., Košćak, J., Duvnjak, I., Bartolac, M., Serdar, M., Dokoza, I., Prekupec, F., Oreb, J., Mušterić, B.: Studija za saniranje posljedica potresa, I-VI faza, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2013-2018.

[39] Sekcija mladih DAZ-a, [ur.]: Zagreb - arhitektura u džepu, DAZ - Društvo arhitekata Zagreba, 2017.

[40] Panoutsopoulou, M., Ioannides, K.: An overview of post-earthquake building inspection practices in Greece and the introduction of a rapid building usability evaluation procedure after the 1996 Konitsa earthquake, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, 1998.

[41] Goretti, A., Di Pasquale, G.: An overview of post-earthquake damage assessment in Italy, EERI Invitational Workshop: An action plan to develop earthquake damage and loss data protocols, Pasadena, 2002.

[42] Grünthal, G.: European Macroseismic Scale, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 15 (1998).

[43] Whitman, R.V., Anagnos, T., Kircher, C.A., Lagorio, H.J., Lawson, R.S., Schneider, P.: Development of a National Earthquake Loss Estimation Methodology, Earthquake Spectra, 13 (1997) 4, pp. 643-661.

[44] Eleftheriadou, A.K., Karabinis, A.I.: Evaluation of damage probability matrices from observational seismic damage data, Earthq. Struct., 4 (2013) 3, pp. 299-324.

[45] Benedetti, D., Petrini, V.: Sulla Vulnerabilità Di Edifici in Muratura: Proposta Di Un Metodo Di Valutazione, L'industria delle Costruzioni, 149 (1984) 1, pp. 66-74.

[46] Hadzima-Nyarko, M., Pavić, G. and Lešić, M.: Seismic vulnerability of old confined masonry buildings in Osijek, Croatia, Earthq. Struct., 11 (2016) 4, pp. 629-648.

[47] Sabetta, F., Goretti, A., Lucantoni, A.: Empirical Fragility Curves from Damage Surveys and Estimated Strong Ground Motion, Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, 1998

[48] Işık, E.: Consistency of the rapid assessment method for reinforced concrete buildings, Earthq. Struct., 11 (2016) 5, pp. 873-885.

[49] Yakut, A.: Preliminary Seismic Performance Assessment Procedure for Existing RC Buildings, Engineering Structures, 26 (2004) 10, pp. 1447-1461.

[50] Rossetto, T., Elnashai, A.: A New Analytical Procedure for the Derivation of Displacement-Based Vulnerability Curves for Populations of RC Structures, Engineering Structures, 7 (2005) 3, pp. 397-409.

[51] Farsangi, E.N., Tasnimi, A.T. and Mansouri, B.: Fragility assessment of RC-MRFs under concurrent vertical-horizontal seismic action effects, Comput. Concrete, 16 (2015) 1, 99-123.

[52] Bernardin,i A., Gori, R., Modena, C.: Application of Coupled Analytical Models and Experimental Knowledge to Seismic Vulnerability Analyses of Masonry Buildings, eds. A. Koridze, Engineering Damage Evaluation and Vulnerability Analysis of Building Structures, Omega Scientific, Oxon, 1990.

[53] Crowley, H, Pinho, R, Bommer, J.: A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation, Bulletin of Earthquake Engineering, 2 (2004) 2, pp. 173-219.

[54] D'Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rossetto, T., Silva, V.: Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low/Mid-Rise Buildings, Methodology, Vulnerability Global Component project, 2015, https://doi.org/ 10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.12

[55] Silva, V., Crowley, H., Varum, H., Pinho, R.: Evaluation of analytical methodologies used to derive vulnerability functions, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 43 (2014) 2, pp. 181-204.

[56] Rossetto, T., Ioannou, I., Grant, D.N.: Existing Empirical Fragility and Vulnerability Functions: Compendium and Guide for Selection, GEM Technical Report 2015-1, 10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2015.01

[57] Pitilakis, K., Crowley, H., Kaynia, A.M. (Eds.): SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk: Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Springer, 27, Springer Science+Business Media Dordrecht, 2014, https://doi.org/ 10.1007/978-94-007-7872-6

[58] Aničić, D.: Vulnerability functions of buildings exposed to earthquake action; Vulnerability of historic monuments and old urban cores, SEISMED - Cooperative Project for Seismic Risk Reduction in the Mediterranean Region, National Report of SFR Yugoslavia for the Second Workshop on Earthquake Vulnerability, Loss and Risk Assessment, Trieste, 1990.

[59] Borozan, J.: Exposure Model for Serbia, SERA Balkans Seismic Risk workshop, Belgrade, Serbia, 2019.

[60] Babič, A., Dolšek, M.: Seismic fragility functions of industrial precast building classes, Engineering Structures, 118 (2016), pp. 357-370, https://doi.org/ 10.1016/j.engstruct.2016.03.069

[61] Ademović, N., Hrasnica, M., Oliveira, D.V.: Pushover analysis and failure pattern of a typical masonry residential building in Bosnia and Herzegovina, Eng. Struct., 50 (2013), pp. 13-29, https://doi.org/ 10.1016/j.engstruct.2012.11.031

[62] Dumova-Jovanoska, E.: Fragility Curves for RC Structures in Skopje Region, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 2004

[63] Uroš, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Prevolnik, S.: Procjena ponašanja postojećih zgrada pri djelovanju potresa, Mini simpozij o numeričkim postupcima, Zagreb, pp. 173-187, 2019. https://doi.org/ 10.5592/CO/YODA.2019.4.4

[64] Pakdamar, F., Kara, F. İ., Eryılmaz, Y., Yeşilyurt, A.: Seismic risk assessment using updated hazard and building inventory data, GRAĐEVINAR, 71 (2019) 5, pp. 375-387, doi: https://doi.org/10.14256/JCE.2329.2018

[65] Uroš, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Crnjac, J., Damjanović, D.: Procjena ponašanja postojećih zgrada pri djelovanju potresa, Zbornik VII. konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa (ur. Holcinger, N.), Zagreb, pp. 119-128, 2018.

[66] Coburn, A., Spence R.: Earthquake Protection, Second Edition, Wiley and Sons, 2002.

[67] Spence, R.: Earthquake disaster scenario predictions and loss modelling for urban areas, LESSLOSS Report 7, IUSS Press, Pavia, Italy, 2007.

[68] Kölz, E., Duvernay B.: Beurteilung der Erdbebensicherheit bestehender Gebäude, Konzept und Richtlinien für die Stufe 1, CH: Bundesamt für Wasser und Geologie, 2005.

[69] Işık, E., Kutanis, M., Bal, İ. E.: Loss Estimation and seismic risk assessment in Eastern Turkey, GRAĐEVINAR, 69 (2017) 7, pp. 581-592, doi: https://doi.org/10.14256/JCE.1242.2015

[70] Bal, İ.E., Crowley, H., Pinho, R., Gülay, G.: Structural characteristics of Turkish building stock in Northern Marmara Region for Loss Assessment Applications, ROSE Research Report 2007/03, IUSS Press, Pavia, 2007.

[71] Brookshire, D.S. i sur.: Direct and Indirect Economic Losses from Earthquake Damage, Earthquake Spectra, 13 (1997) 4 pp. 683-701, https://doi.org/ 10.1193/1.1585975

[72] Privremeni tehnički propisi za građenje u seizmičkim područjima, SFRJ 39/64, 1964.

[73] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima, SFRJ 31/81, 49/82, 29/83, 20/88, 52/90.

[74] Penelis, G., Venkov, Z., Zambas, C., Csak, B., Popp. T., Kuban, D., Aničić, D.: Repair and Strengthening of Historical Monuments and Buildings in Urban Nuclei, UNDP/UNIDO Project RER/79/015, 6 (1984), pp. 1-297.

[75] Simeonov, S., Sotirov, P., Tsoukantas, S.G., Goschy, B., Constantinescu, D., Ozden, K., Aničić, D.: Design and Construction of Prefabricated Reinforced Concrete Building Systems, UNDP/UNIDO Project RER/79/015, 2 (1985), pp. 1-335.

[76] Milutinović, Z.: Overview on systemic management of seismic risk in SFR Yugoslavia – experience and contribution of IZIIS, SERA Balkans Seismic Risk workshop, Belgrade, Serbia, 2019.

[77] Aničić., D., Mihaliov, V., Velkov, M.: Obnova, seizmičko ojačanje i konstruktivna sanacija spomenika kulture u staroj gradskoj jezgri Dubrovnika, Zavod za obnovu Dubrovnika, 1988.

[78] Aničić, D. i sur.: Zemljotresno inženjerstvo: visokogradnja, Građevinska knjiga, Beograd, 1990.

[79] Aničić, D.: Prognoza štete na stambenom fondu i broja žrtava mogućeg budućeg potresa u Zagrebu, Civilna zaštita, Zagreb, pp. 135-143, 1992.

[80] Aničić, D., Zaninović, V.: Seizmička opasnost za mostove u Hrvatskoj, Ceste i mostovi, Zagreb, 39 (1993) 1-2, pp. 15-19.

[81] Aničić, D.: Seizmički rizik za mostove, Ceste i mostovi, Zagreb, 39 (1993) 4, pp. 89-94.

[82] Procjena ugroženosti stanovništva, materijalnih i kulturnih dobara i okoliša od katastrofa i velikih nesreća za područje grada Zagreba, Gradska skupština Grada Zagreba, Zagreb, 2016.

[83] Aničić, D. i sur.: Potresni rizik grada Zagreba - Infrastruktura, stanovništvo, građevine i kulturna dobra, Prijedlog projekta - verzija 3.0, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske i Ured za upravljanje u hitnim situacijama Grada Zagreba, 2014.

[84] Šavor Novak, M., Atalić, J., Damjanović, D., Uroš, M., Krolo, J., Sigmund, Z., Košćak, J., Korlaet, L., Bartolac, M., Duvnjak, I. Hak, S.: Study on Seismic Risk Mitigation in the City of Zagreb, Croatia, Proceedings of the VII Conference of Croatian platform for disaster risk reduction (ur. Holcinger, N.), Zagreb, pp. 127-134, 2018.

[85] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M., Hak, S., Damjanović, D., Sigmund, Z.: Measures for the earthquake risk reduction in the city of Zagreb, Croatia, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, 2018.

[86] Damjanović, D., Bartolac, M., Duvnjak, I., Košćak, J., Krolo, J.: Eksperimentalno određivanje dinamičkih parametara građevina, Zbornik VII. konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa (ur. Holcinger, N.), Zagreb, pp. 80-88, 2018.

[87] Hadzima-Nyarko, M., Kalman Šipoš, T., Pavić, G., Trbojević, M., Markasović, D.: Potresna oštetljivost i karakteristike zgrada gradskog bloka u Osijeku, Zbornik VII. konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa (ur. Holcinger, N.), Zagreb, pp. 94-101, 2018

[88] Kalman Šipoš, T., Hadzima-Nyarko, M.: Rapid Seismic Risk Assessment, International Journal of Disaster Risk Reduction, 24 (2017), pp. 348-360.

[89] Hadzima-Nyarko, M.: Creating the database of buildings of Osijek, Croatia, research performed at the Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek, SERA Balkans Seismic Risk workshop, Belgrade, 2019.

[90] Hadzima-Nyarko, M., Ademović, N., Pavić, G.: Procjena seizmičke oštetljivosti starih zidanih zgrada pomoću analitičke metode, Proceedings of the 6th international conference Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Kraljevo, pp. 317-324, 2018.

[91] Hadzima-Nyarko, M., Nikić, D., Morić, D.: Potresno inženjerstvo – procjena oštetljivosti zgrada, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, 2018.

[92] Copernicus Emergency Management Service (© 2017 European Union), EMSN039, 2017.

[93] Milutinovic, Z., Trendafilovski, G.: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns - WP4: Vulnerability of current buildings, RISK-EU project, 2003.

[94] Giovinazzi, S., Lagomarsino, S.: A Macroseismic Model for the vulnerability assessment of buildings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, No. 896, 2004.

[95] Yucemen, M.S.: Probabilistic assessment of earthquake insurance rates for Turkey, Natural Hazards, 35 (2005) 2, 291-313.

[96] Crowley, H i sur.: Towards a uniform earthquake risk model for Europe, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, 2018.

[97] Silva, V. i sur.: Global Earthquake Model (GEM) Seismic Risk Map (version 2018.1), https://doi.org/ 10.13117/GEM-GLOBAL-SEISMIC-RISK-MAP- 2018., 2018.

[98] Shaw, R., Izumi, T., Shi, P.: Perspectives of Science and Technology in Disaster Risk Reduction of Asia, Perspectives of Science and Technology in Disaster Risk Reduction of Asia, 7 (2016) 4, pp. 329-342.

[99] Atalić, J., Sigmund, Z., Šavor Novak, M., Uroš, M., Damjanović, D., Duvnjak, I., Košćak, J., Dokoza, I., Reich, S., Prekupec, F.: Uloga građevinskih stručnjaka u situacijama nakon razornih potresa, Zbornik VII. konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa, (ur. Holcinger, N.), Zagreb, pp. 135-143, 2018.

[100] Prevolnik, S., Mustać, M., Herak, M., Alegretti, I., Dasović, I., Fiket, T., Ivančić, I., Kuk, K., Markušić, S., Sović, I., Stipčević, J., Štih, D., Atalić, J., Šavor Novak, M.: Instrumental measurements of SPBs in the Dubrovnik-Neretva County, University of Zagreb, Faculty of Science, Department of Geophysics and University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Engineering Mechanics, Interreg Readiness, Italy-Croatia, European Regional Development Fund, EU, 2019.

[101] Prevolnik, S., Herak, M., Dasović, I., Fiket, T., Ivančić, I., Kuk, K., Markušić, S., Mustać, M., Sović, I., Stipčević, J., Štih, D., Uroš, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lazarević, D., Damjanović, D., Bartolac, M.: Seismic performance assessment of Building D of General Hospital Dubrovnik, University of Zagreb, Faculty of Science, Department of Geophysics and University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Engineering Mechanics, Interreg Readiness, Italy-Croatia, European Regional Development Fund, EU, 2019.

[102] Işık, M.F., Işık, E., Bülbül, M.A.: Application of iOS/Android based assessment and monitoring system for building inventory under seismic impact, GRAĐEVINAR, 70 (2018) 12, pp. 1043-1056, doi: https://doi.org/10.14256/JCE.1522.2015